

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN  
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F.S. ROSTÁSY

Einfluß der Art, Kornform und Korn-  
zusammensetzung des Mehlkorns auf  
die Betoneigenschaften

Untersuchungsbericht erstattet von  
F.S. Rostásy und E.H. Ranisch  
Braunschweig im August 1980

Bericht über die vom Bundesminister für Verkehr geför-  
derte Forschungsarbeit Nr. 8.055 R 78 B

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
D-3300 Braunschweig 99

## 1. Einleitung

Die Betonbestandteile mit einem Korndurchmesser kleiner als 0,25 mm werden in der Betontechnologie als "Mehlkorn" bezeichnet. In der Regel besteht das Mehlkorn aus dem Zement und den Feinstanteilen des Zuschlages. Außerdem können noch Betonzusatzstoffe wie latent hydraulische Stoffe, Gesteinsmehle oder Pigmente zugegeben werden. Sofern sie als Volumenbestandteile zu berücksichtigen sind, werden sie dem Mehlkorn zugerechnet.

Latenthydraulische Zusatzstoffe werden solche Stoffe genannt, die in Anwesenheit von Zement und Wasser hydraulisch erhärten, wobei die Erhärungsreaktion im wesentlichen von der Menge des Calciumhydroxids  $\text{Ca(OH)}_2$  im Zement abhängt. Künstliche latenthydraulische Zusatzstoffe sind die Elektrofilteraschen, auch Flugaschen oder Füller genannt, ein natürlicher oder puzzolanischer Zusatzstoff ist der Traß.

Das Mehlkorn beeinflusst die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Die DIN 1045 "Beton- und Stahlbetonbau" führt dazu in Abs. 6.5.4 aus:

"Der Beton muß eine bestimmte Menge an Mehlkorn enthalten, damit er gut verarbeitbar ist und ein geschlossenes Gefüge erhält ..... Ein ausreichender Mehlkorngesamtgehalt ist besonders wichtig bei Beton, der über längere Strecken oder in Rohrleitungen gefördert wird, bei Beton für dünnwandige, eng bewehrte Bauteile, bei wasserundurchlässigem Beton. Der Mehlkorngesamtgehalt soll möglichst auf das für die Verarbeitung notwendige Maß beschränkt werden, besonders wenn Betoneigenschaften wie hoher Frostwiderstand, hoher Widerstand gegen chemische Angriffe oder hoher Abnutzwiderstand gefordert werden, weil sie durch einen zu hohen Mehlkorngesamtgehalt nachteilig beeinflusst werden können".

Die Tabelle 3 der DIN 1045 gibt Anhaltswerte für den Mehlkorngehalt in Abhängigkeit vom Größtkorn des Zuschlaggemisches. Der Anhaltswert für 8 mm Größtkorn beträgt 525 kg und für 32 mm Größtkorn 400 kg in 1 m<sup>3</sup> verdichtetem Beton.

Ein latenthdraulischer oder puzzolanischer Zusatzstoff darf auf den Zementgehalt nur angerechnet werden, soweit dies besonders geregelt ist, z.B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder durch Richtlinien.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden mit den gebräuchlichsten Mehlkornarten vergleichende Betonuntersuchungen durchgeführt. Damit sollte der Wissensstand über den Einfluß der Mehlkornart und -menge auf die Betoneigenschaften erweitert werden und dem Betontechnologen die Auswahl und Dosierung von Betonzusatzstoffen erleichtert werden.

## 2. Versuchsprogramm

### 2.1 Arten der Zusatzstoffe

Es wurden drei verschiedene Arten von Zusatzstoffen ausgewählt:

1. Latenthdraulische Zusatzstoffe
2. Gesteinsmehle
3. Natursande

#### 2.1.1 Latenthdraulische Zusatzstoffe

##### 2.1.1.1 Steinkohlenflugasche EFA-Füller BM-II

Prüfzeichen: PA VII-21/105

"Flugasche A"

##### 2.1.1.2 Steinkohlenflugasche HIB 30 S-B/C

Prüfzeichen: PA VII-21/102

"Flugasche B"

##### 2.1.1.3 Traß nach DIN 51 043

Herstellwerk Meurin

### 2.1.2 Gesteinsmehle

#### 2.1.2.1 Quarzmehl "Silicit"

Hersteller: Quarzwerke GmbH., Frechen

#### 2.1.2.2 Kalksteinmehl

Hersteller: Fels-Werke, Salzgitter GmbH.

### 2.1.3 Natursande

Die Natursande wurden durch Aussieben der Korngruppe  
o - o,25 mm erhalten.

#### 2.1.3.1 Natursand A

(Grube Abbesbüttel bei Braunschweig)

#### 2.1.3.2 Natursand B

(Grube Sengwarden bei Wilhelmshaven)

### 2.2 Untersuchung der Zusatzstoffe und des Zements

#### 2.2.1 Chemische Analyse der Hauptbestandteile

#### 2.2.2 Petrografische Untersuchungen (Röntgenfeinstruktur- analysen)

#### 2.2.3 Mikroskopische Untersuchungen (Kornform)

#### 2.2.4 Spezifische Oberfläche (Blainewert)

#### 2.2.5 Siebanalyse

#### 2.2.6 Festigkeit des Zements

### 2.3 Untersuchung des Mehlkornmörtels

Die folgenden Untersuchungen wurden an einem Mörtel durchgeführt, der analog zu den Prüfrichtlinien des IfBt für latenthydraulische Betonzusatzstoffe zusammengesetzt war:

360 g	Zement PZ 35 F
90 g	Zusatzstoff
1350 g	Normsand nach DIN 1164
225 g	Wasser

Folgende Mörtelversuche wurden durchgeführt:

- 2.3.1 Wasseranspruch (Ausbreitmaß nach DIN 18 555 in Abhängigkeit vom Wassergehalt)
- 2.3.2 Absetzmaß nach der Einpreßrichtlinie
- 2.3.3 Konsistenz nach DIN 18 555
- 2.3.4 Druck- und Biegezugfestigkeit nach DIN 1164

#### 2.4 Untersuchungen am Beton

##### 2.4.1 Betonzusammensetzung für 1 m<sup>3</sup>:

Zement : 320 kg PZ 35 F  
Wasserzementwert: 0,54  
Zusatzstoff o/o,25 mm: 0,50,100,150 und 200 kg  
Zuschlag nach DIN 4226 aus dem nördlichen Harzvorland, Sieblinie AB 32.

##### 2.4.2 Frischbetonuntersuchungen

- 2.4.2.1 Ausbreitmaß
- 2.4.2.2 Verdichtungsmaß
- 2.4.2.3 Vebé-Wert (Brit. Stand. 1881)
- 2.4.2.4 Luftporengehalt
- 2.4.2.5 Rohdichte

##### 2.4.3 Festbetonuntersuchungen

- 2.4.3.1 Druckfestigkeit
- 2.4.3.2 Biegezugfestigkeit
- 2.4.3.3 Spaltzugfestigkeit
- 2.4.3.4 Elastizitätsmodul
- 2.4.3.5 Wasserundurchlässigkeit
- 2.4.3.6 Frost-Tausalz-Widerstand

### 3. Untersuchung der Zusatzstoffe und des Zements

#### 3.1 Hauptbestandteile

Die Hauptbestandteile der Zusatzstoffe und des Bindemittels (PZ 35 F "Teutonia") nach chemischer bzw. petrographischer Röntgenfeinstrukturanalyse sind in Tabelle 3.1 aufgeführt (siehe Blatt 7).

#### 3.2 Kornform, Kornverteilung und Blainewert

##### 3.2.1 Kornform

Die Zusatzstoffe wurden mikroskopisch untersucht, und die Kornform wurde nach Rundungsgraden nach Russel-Taylor-Pettijohn<sup>1)</sup> beschrieben. Die Bilder 3.1 bis 3.7 zeigen mikroskopische Aufnahmen der Kornfraktion 0,032 bis 0,040 mm. Die Rundungsgrade sind in der Tabelle 3.2 angegeben.

##### 3.2.2 Kornverteilung und spezifische Oberfläche

Die Kornverteilung wurde mit einem Alpine-Luftstrahlsieb mit den Sieben 0,032/0,040/0,063/0,09/0,2/0,5 und 1 mm bestimmt. Die Sieblinien sind auf den Bildern 3.9 und 3.10 dargestellt. Traß, Flugasche A und Kalksteinmehl waren besonders feinkörnig. Ihre Kornverteilung war ähnlich. Die Flugasche B war deutlich grobkörniger, aber ihre Sieblinie verlief noch oberhalb der Sieblinie des Quarzmehls. Die beiden Natursande enthielten praktisch keine Anteile < 0,063 mm. Sie waren somit erheblich grobkörniger als die künstlichen Zusatzstoffe.

---

1) German Müller: Methoden der Sediment-Untersuchung  
Teil 1, Stuttgart 1964

T a b e l l e 3.1: Hauptbestandteile der Zusatzstoffe und des Zements in Gew.-%

Zement	Flugasche A	Flugasche B	Traß	Quarzmehl	Kalkstein- mehl	Sand A	Sand B
PZ 35 F	EFA-Füller	HIB-Füller	Meurin	Silicit	Fels-Werke	Abbesbüttel	Sengwarden
21,0% SiO <sub>2</sub>	~ 5% SiO <sub>2</sub> (Quarz)	~ 10% SiO <sub>2</sub> (Quarz)	30% SiO <sub>2</sub> (Quarz)	100% SiO <sub>2</sub> (Quarz)	fast reiner Calcit CaCO <sub>3</sub>	97% SiO <sub>2</sub> (Quarz)	95% SiO <sub>2</sub> (Quarz)
1,9% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5,0% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<5% Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> (Silimonit)	<5% Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> (Silimonit)	25% Na (AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ) H <sub>2</sub> O (Analcim)		Spuren von Quarz u. Dolomit CaMg(CO <sub>3</sub> )	3% Feldspat	5% Feldspat
67,7% CaO	2% Koks	2% Koks					
1,0% MgO	~ 90% Glas- kugeln	~ 80% Glas- kugeln	5% Muskowit				
2,8% SO <sub>3</sub>			40% Glas- matrix				
0,7% Rest							

- 7 -

I  
8  
I

Die spezifische Oberfläche der Zusatzstoffe (Blainewert) wurde mit dem Luftdurchlässigkeitsverfahren nach DIN 1164 bestimmt. Sie ist in der Tabelle 3.2 angegeben. Die Natur-sande waren für die Bestimmung des Blainewertes zu grob. Die Blainewerte der Flugaschen und des Kalksteinmehls liegen in der Größenordnung des untersuchten Portlandzements PZ 35 F mit 3200 - 3330 cm<sup>2</sup>/g. Der Blainewert von Traß liegt mit über 5600 cm<sup>2</sup>/g erheblich höher, der des Quarzmehls mit 2070 darunter.

T a b e l l e 3.2: Eigenschaften des Mehlkorns  
- Reindichte, Kornform, Blainewert -

	Reindichte g/cm <sup>3</sup>	Kornform -	Blainewert cm <sup>2</sup> /g
Zement	3,130	-	3200 - 3330
Flugasche A	2,404	> 90% Kugeln gut gerundet	3640
Flugasche B	2,166	~ 50% Kugeln gerundet	2910
Traß	2,518	angular	5611
Quarzmehl	2,663	subangular	2070
Kalksteinmehl	2,749	angerundet	3850
Sand A	2,656	subangular/ angerundet	-
Sand B	2,650	subangular/ angerundet	-

### 3.2.3 Festigkeitseigenschaften des Zements

Die Druck- und Biegezugfestigkeit des Zements wurde an Prismen 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup> nach DIN 1164 geprüft. Die Prüfungen wurden einmal zu Beginn der Versuche am 13.09.78 und nach Abschluß der Versuche am 12.02.80 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 wiedergegeben.



T a b e l l e 3.3: Zementfestigkeit nach DIN 1164

Prüfalter	Prüfung vor Versuchsbeginn		Prüfung nach Versuchsende	
	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
Tage	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
2	4,5	20,7	-	-
7	6,6	36,0	7,4	39,6
28	7,8	45,2	8,3	51,0
90	8,0	49,4	8,5	56,4

#### 4. Untersuchung des Mehlkornmörtels

Es wurde mit den Zusatzstoffen ein Mörtel in Anlehnung an DIN 1164 Teil 7 hergestellt. Dabei wurden von den dort vorgesehenen 450 g Zement 90 g durch den Zusatzstoff ersetzt. Als Zuschlag wurden 1350 g Normsand verwendet.

##### 4.1 Wasseranspruch

Unter dem Wasseranspruch des Mehlkornmörtels wird diejenige Wassermenge verstanden, die zur Erzielung einer bestimmten Konsistenz zugegeben werden muß. Zur Messung der Konsistenz dient der Ausbreitversuch nach DIN 18 555.

Zur Bewertung der Zusatzstoffe bot sich die Ermittlung derjenigen Wassermenge an, mit der die Konsistenz des reinen Zementmörtels erreicht wird. Dazu wurde das Wasser in Stufen von 30 g beginnend mit 195 g zugegeben und auf jeder Stufe das Ausbreitmaß bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 4.1-4.4 dargestellt. Das Ausbreitmaß nimmt in Abhängigkeit von der Zeit ab (s. Abs.4.3). Die Kurven auf den Bildern 4.1-4.4 sind jedoch rechnerisch von der Zeitabhängigkeit bereinigt worden.

Anhand der Kurven wurde schließlich der gesuchte Wasseranspruch grafisch ermittelt. Er ist in der Tabelle 4.1 in Prozent vom reinen Zementmörtel angegeben. Danach reduzierte nur die Flugasche A den Wasseranspruch während die Natursande den Wasseranspruch erhöhten. Die übrigen Zusatzstoffe waren ohne signifikanten Einfluß.

Tabelle 4.1 siehe Blatt 11.

#### 4.2 Absetzmaß

Die Bestimmung des Absetzmaßes nach der Einpreßrichtlinie<sup>1)</sup> liefert Erkenntnisse über etwaige Volumenänderungen und Wasserabsonderungen des Mörtels innerhalb der ersten 24 Stunden. Dazu wird der Mörtel 100 mm hoch in eine Konservendose eingefüllt und anschließend luftdicht verschlossen. Nach 24 Stunden werden mit einer Tiefenlehre die Höhenänderung und die Dicke der Wasserschicht gemessen. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Im Vergleich zum reinen Zementmörtel bewirkten die Flugaschen eine vergrößerte Wasserabsonderung während der Traß die Wasserabsonderung auf 0 reduzierte. Die übrigen Zusatzstoffe beeinflussten die Wasserabsonderung nicht.

Das Absetzmaß betrug beim reinen Zementmörtel, bei den Gesteinsmehlen und bei den Sanden rund 2 Vol.-%, bei den Flugaschen 2,3-2,4 und bei Traß nur 1,2 Vol.-%.

---

1) Deut. Ausschuß für Stahlbeton: Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spannkänäle (Fassung Juni 1973)

T a b e l l e 4.1: Ergebnisse der Mörteluntersuchungen

Mehlkornart	Ausbreit- maß  cm	Wasser- anspruch  %	Absetz- maß  Vol.-%	Wasserab- sonderung  Vol.-%	Frisch- raumge- wicht  kg/m <sup>3</sup>	Biegezugfestigkeit			Druckfestigkeit		
						7	28	90	7	28	90
						Tage			Tage		
Zement (1)	14,3	100	2,0	0,6	2222	6,57	7,77	8,18	36,0	45,2	49,4
Zement (2)	14,8		2,1	0,5	2234	7,37	8,33	8,46	39,6	51,0	56,4
Flugasche A	17,1	92	2,3	1,3	2272	6,06	7,91	8,79	28,6	41,9	52,5
Flugasche B	14,4	100	2,4	1,2	2213	5,52	7,10	7,78	27,1	37,1	47,0
Traß	13,7	102	1,2	0,0	2204	6,15	7,71	7,77	29,7	41,0	48,0
Quarzsand	13,7	103	2,0	0,7	2236	5,42	6,63	6,53	25,2	33,9	38,3
Kalkstein- mehl	14,4	98	2,0	0,6	2242	5,79	7,32	7,42	27,8	37,7	40,5
Sand A	12,9	109	2,0	0,7	2209	5,44	7,08	6,75	24,9	35,1	36,7
Sand B	12,9	107	2,1	0,7	2221	5,34	6,20	6,94	25,4	33,5	35,5

#### 4.3 Ausbreitmaß

Das Ausbreitmaß wurde nach DIN 18 555 bestimmt. Um einen Einblick in das zeitabhängige Ansteifverhalten der Mörtel zu gewinnen, wurde der Ausbreitversuch in Abständen von 20 Min. solange wiederholt, bis das Ausbreitmaß weniger als 12 cm betrug. Das Ausbreitmaß als Funktion der Zeit zeigen die Bilder 4.5-4.8, die Ausbreitmaße unmittelbar nach dem Mischen die Tabelle 4.1.

Es zeigte sich, daß nur die Flugasche A das Ausbreitmaß vergrößerte, während die anderen Zusatzstoffe das Ausbreitmaß mehr oder weniger verkleinerten. Das zeitabhängige Ansteifverhalten wurde durch die Zusatzstoffe nicht signifikant beeinflusst.

#### 4.4 Druck- und Biegezugfestigkeit

Die Druck- und Biegezugfestigkeit wurde im Alter von 7, 28 und 90 Tagen an Mörtelprismen  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  nach DIN 1164 geprüft. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

#### 4.5 Bewertung der Versuchsergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse der Mörtelversuche, nämlich die Druck- und Biegezugfestigkeit und das Ausbreitmaß sind auf Bild 4.9 in einer vergleichenden Übersicht veranschaulicht. Man erkennt dort, daß der Ersatz von 20% Zement durch latenthydraulische Zusatzstoffe bei ausreichender Erhärtungszeit keine auffälligen Festigkeitseinbußen bewirkt. Die Erhärtungsgeschwindigkeit wird jedoch deutlich herabgesetzt. Die Erhärtungsgeschwindigkeit der Flugaschen hängt offenbar von deren Korngröße ab. So erhärtete die gröbere Flugasche B deutlich langsamer als Flugasche A. Die übrigen Zusatzstoffe hatten Festigkeitsverluste entsprechend der Erhöhung des Wasserzementwertes zur Folge.

Die glaskugelige Flugasche A bewirkte eine deutliche Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Die Flugasche B und das Kalksteinmehl veränderten die Verarbeitbarkeit nicht signifikant, während die übrigen Zusatzstoffe die Verarbeitbarkeit herabsetzten. Dabei scheint die Kornform von stärkerem Einfluß als die Kornzusammensetzung bzw. spezifische Oberfläche zu sein.

## 5. Untersuchungen am Beton

### 5.1 Zusammensetzung und Herstellung der Versuchsbetone

Die Untersuchungen sollten an einem Konstruktionsbeton der Festigkeitsklasse B 35 mit einer Zusammensetzung nach DIN 1045 durchgeführt werden. Der sogenannte Nullbeton enthielt keine Zusatzstoffe. Für die Untersuchungen des Einflusses des Mehlkorns auf die Betoneigenschaften wurden dem Nullbeton die sieben feinkörnigen Zusatzstoffe in Dosierungsmengen von 50, 100, 150 und 200 kg/m<sup>3</sup> zugegeben und als Volumenbestandteile berücksichtigt. Der Zement- und Wassergehalt blieb konstant. Als Zuschlag wurde Kies-Sand nach DIN 4226 der Sieblinie AB 32 (siehe Bild 5.1) aus dem nördlichen Harzvorland verwendet. Die Zusammensetzung des Nullbetons zeigt Tabelle 5.1.

T a b e l l e 5.1: Zusammensetzung des Nullbetons

Zement PZ 35 F	320 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	173 kg/m <sup>3</sup>
Sand 0/2 mm	35 Vol.-%
Kies 2/8 mm	15 Vol.-%
Kies 8/16 mm	25 Vol.-%
Kies 16/32 mm	25 Vol.-%
Zuschlag gesamt	1877 kg/m <sup>3</sup>
Mehlkorngehalt	399 kg/m <sup>3</sup>
Wasserzementwert	0,54

Der Sand 0/2 mm wurde in trockenem Zustand zugegeben, um die Streuung der Versuchsergebnisse durch schwankende Eigenfeuchte gering zu halten. Die Eigenfeuchte der übrigen Zuschlagsfraktionen wurde jeweils durch Darren bestimmt und bei der Wasserzugabe berücksichtigt.

Die Versuchsbetone wurden in der Zeit von Juni 1979 bis März 1980 hergestellt. Im Laufe dieses Zeitraumes wurde der Nullbeton sechsmal hergestellt. Von den Mischungen mit Zusatzstoffen wurden diejenigen mit Dosierungsmengen von 100 und 200 kg/m<sup>3</sup> in der Regel jeweils zweimal und die übrigen Mischungen einmal hergestellt. Aus der 1. Mischung von 70 l Frischbeton wurden die Probekörper für die Prüfung der Druckfestigkeit  $\beta_{W28}$ , der Biegezugfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit angefertigt. Aus der 2. Mischung von 90 l wurden die Probekörper für die Prüfung der Druckfestigkeiten  $\beta_{W7}$ ,  $\beta_{W28}$  und  $\beta_{W56}$  sowie für die Prüfung des E-Moduls, der Wasserundurchlässigkeit und des Frostwiderstandes hergestellt.

Gemischt wurde in einem 100 l Laborzwangsmischer, und zwar zuerst 30 s lang trocken und nach der Wasserzugabe weitere 2 Minuten.

## 5.2 Durchgeführte Frischbetonuntersuchungen

### 5.2.1 Allgemeines

An allen Versuchsbetonen wurden die folgenden Untersuchungen in der angegebenen Reihenfolge jeweils zweimal durchgeführt, und zwar einmal unmittelbar nach dem Mischen und einmal beginnend 30 Minuten nach der Wasserzugabe. Die Prüfung des Luftgehalts erfolgte nur einmal (15 Minuten nach der Wasserzugabe).

T a b e l l e 5.2

(siehe Blatt 15)

T a b e l l e 5.2: Frischbetonuntersuchungen

Prüfung	Prüfvorschrift	Prüfzeitpunkt ab Wasserzugabe in Minuten	
Betontemperatur	-	0	30
Ausbreitmaß	DIN 1048	4	30
Vebe-Wert	BS 1881	8	34
Verdichtungsmaß	DIN 1048	10	36
Rohdichte	DIN 1048	14 <sup>1)</sup>	45 <sup>2)</sup>
LP-Gehalt	DIN 1048	15	-

1) Frischbetonrohichte im 8 l Drucktopf

2) Frischbetonrohichte in 15 cm Kunststoffwürfelform

Alle Versuche führte ein und derselbe Laborant durch. Die Lufttemperatur im Labor betrug  $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$ .

#### 5.2.2 Ausbreitmaß

Der Ausbreitversuch dient zur Bestimmung der Frischbetonkonsistenz. Gemessen wird die Verformbarkeit des Betons infolge Schlageinwirkung. Das Ausbreitmaß ist der Durchmesser der ausgebreiteten Probe. Das Verfahren ist nach DIN 1048 genormt.

#### 5.2.3 Vebe-Wert

Der Vebe-Versuch dient zur Bestimmung der Verformbarkeit und Verdichtbarkeit des Betons unter Rüttelwirkung. Das Vebe-Gerät besteht aus einem kleinen Vibrationstisch mit einem aufgeschraubten zylindrischen Behälter (Durchmesser 24 cm, Höhe 20 cm). Darin wird aus dem zu untersuchenden Beton ein Kegelstumpf ähnlich wie beim Ausbreitversuch hergestellt. Auf den entformten Kegelstumpf wird eine horizontale Glasplatte, die in vertikaler Richtung beweglich

ist, abgesenkt. Bei Ingangsetzung der Vibration sinkt der Kegelstumpf zunächst zusammen und wird dann durch die Rüttelenergie und das Gewicht der Glasplatte in dem zylindrischen Behälter verdichtet. Es wird mit einer Stoppuhr die Zeit gemessen vom Beginn der Vibration bis zu dem Augenblick, bei dem die Glasplatte an der Unterseite vollständig mit Mörtel benetzt ist. Diese Zeit in Sekunden ist der Vebe-Wert. Er liegt zwischen rd. 2 und 100. Das Verfahren ist in British Standard 1881 genormt.

#### 5.2.4 Verdichtungsmaß

Der Verdichtungsversuch dient zur Bestimmung der Frischbetonkonsistenz. Gemessen wird die Volumenverminderung einer lose eingefüllten Betonprobe in einer Stahlform infolge Rüttelwirkung. Das Verfahren ist nach DIN 1048 genormt.

#### 5.2.5 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt des Frischbetons wurde mit dem Druckausgleichsverfahren nach DIN 1048 bestimmt. Die Verdichtungszeit auf einem Rütteltisch betrug 60 s. Außer dem LP-Gehalt wurde die Frischbetonrohichte bestimmt.

#### 5.2.6 Betontemperatur

Es wurde eine konstante Frischbetontemperatur von  $19^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$  angestrebt. Die Ergebnisse der Messungen unmittelbar nach dem Mischen mit einem Eintauchthermometer sind in der Tabelle 6.1 wiedergegeben. Innerhalb der ersten 30 Minuten stieg die Betontemperatur um rund  $1^{\circ}\text{C}$  an.

### 5.3 Durchgeführte Festbetonuntersuchungen

#### 5.3.1 Allgemeines

Die Formen für die Probekörper wurden ca. 45 Minuten nach der Wasserzugabe gefüllt und anschließend 60 s lang auf einem Rütteltisch verdichtet. Das Ausschalen erfolgte nach



24 h. Die Probekörper zur Prüfung der Biegezugfestigkeit lagerten bis zum Prüftag unter Wasser; alle übrigen Prüfkörper lagerten 7 Tage unter Wasser und anschließend im Normklima 20/65.

#### 5.3.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Versuchsbetone wurde an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge im Alter von 7, 28 und 56 Tagen nach DIN 1048 geprüft.

#### 5.3.3 Biegezug- und Spaltzugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit der Versuchsbetone wurde an Balken 15 x 15 x 70 cm<sup>3</sup> im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048 geprüft. An den 2 Reststücken der geprüften Balken wurde die Spaltzugfestigkeit ebenfalls nach DIN 1048 im Alter von 28 Tagen bestimmt.

#### 5.3.4 Elastizitätsmodul

Der E-Modul der Versuchsbetone wurde an Zylindern von 15 cm Durchmesser und 35 cm Höhe im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048 geprüft. Angegeben wird der Sekantenmodul nach 10maliger Vorbelastung mit einer Oberlast von rd. 30% der Bruchlast.

#### 5.3.5 Wasserundurchlässigkeit

Die Wasserundurchlässigkeit der Versuchsbetone wurde an Platten mit den Abmessungen 20 x 20 x 12 cm<sup>3</sup> im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048 geprüft.

#### 5.3.6 Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand der Versuchsbetone wurde an jeweils 2 Würfeln mit 10 cm Kantenlänge beginnend im Alter von 56 Tagen bestimmt. Dazu wurden die Würfel in 3%ige NaCl-Lösung eingetaucht und 50 Frost-Tauwechseln ausgesetzt. Eine Frost-Auftau-Periode bestand aus 15,5 stündigem Einfrieren

bei  $-15^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$  und 8,5 stündigem Auftauen in Wasser von rd.  $20^{\circ} \text{ C}$ .

Gemessen wurde nach jeweils 10 Frost-Tauwechseln der Volumenverlust der Würfel infolge Abwitterung.

## 6. Ergebnisse der Betonuntersuchungen

### 6.1 Allgemeines

In der Baupraxis ergeben sich bei Untersuchungen an Betonen mit gleicher Sollzusammensetzung oft beträchtliche Unterschiede. Die wichtigsten Ursachen hierfür sind die stark streuenden Eigenschaften der Baustoffe infolge ihrer natürlichen Herkunft, Ungenauigkeiten beim Dosieren, schwankende Eigenfeuchte im Zuschlag, Unterschiede beim Mischen, Einbringen und Verdichten und z.T. beträchtliche Prüfstreuungen selbst bei strenger, normengerechter Durchführung.

Bei labormäßiger Arbeit sind die Streuungen der Versuchsergebnisse zwar kleiner; oft sind sie jedoch immer noch von derselben Größenordnung wie der Einfluß der variierten Versuchsparemeter.

Die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen sind auf den Tabellen 6.1 und 6.2 zusammengestellt. Dort kann man leicht erkennen, daß sich die einzelnen gleichartig angestrebten Nullbetone z.T. stärker voneinander unterscheiden als von den Versuchsbetonen mit Zusatzstoffen. Deshalb kann von den Versuchsergebnissen nicht mehr erwartet werden, als daß sie günstigenfalls Tendenzen aufzeigen. Entsprechend der großen Streuungen ergaben versuchsweise durchgeführte Regressionsanalysen z.T. nur Korrelationskoeffizienten unter 0,6 und waren damit unbrauchbar. Insbesondere ist es anhand der Versuchsergebnisse nicht möglich gewesen, eine eventuelle "optimale" Dosierungsmenge der Zusatzstoffe zu erkennen.

## 6.2 Frischbetoneigenschaften

### 6.2.1 Konsistenz

Mit Ausnahme der Flugasche A bewirkten alle Zusatzstoffe proportional zu ihrer Dosierungsmenge ein Ansteifen der Konsistenz (s. Bild 6.3). Das Ansteifen war umso stärker ausgeprägt, je feinkörniger der Zusatzstoff war. Die Flugasche A bewirkte bei hohen Dosierungsmengen eine leichte Verflüssigung. Hierfür war offenbar der hohe Anteil von kugelförmigen Glaspartikeln verantwortlich, da die Flugasche B mit ihrem deutlich geringeren Glasanteil keine Verbesserung der Konsistenz bewirkte.

Die Konsistenzmessungen unmittelbar nach dem Mischen und nach 30 Minuten dienten der Bestimmung des zeitabhängigen Ansteifverhaltens. Dabei lieferten der Aushreitversuch und der Verdichtungsversuch z.T. gegenläufige Ergebnisse. In der Tendenz scheinen die Flugaschen jedoch das Ansteifen geringfügig zu beschleunigen, während die anderen Zusatzstoffe ohne signifikanten Einfluß sind.

### 6.2.2 Verarbeitbarkeit

Unter Verarbeitbarkeit sollen hier Eigenschaften verstanden werden wie Verformbarkeit, Neigung zu Wasserabsonderung und Entmischung, Zusammenhaltevermögen und Pumpbarkeit. Die Beurteilung erfolgt üblicherweise nach Augenschein.

Die Zugabe von Flugasche A bewirkte eine deutliche Verbesserung aller Verarbeitbarkeitsmerkmale. Bei hohen Zugabemengen überwog die "Schmierwirkung" der Glaskugeln gegenüber der ansteifenden Wirkung des erhöhten Wasseranspruchs.

Die Verbesserung der Verarbeitbarkeit war bei Zugabe von Flugasche B deutlich geringer als bei Flugasche A. Daraus ist zu schließen, daß der Anteil der Glaskugeln von entscheidender Bedeutung ist.

Die Zugabe von Traß bewirkte proportional zur Dosierungsmenge eine so starke Abnahme der Verarbeitbarkeit, daß Dosierungsmengen über  $50 \text{ kg/m}^3$  von daher auszuschließen sind.

Die Zugabe der Gesteinsmehle und der Natursande bewirkte bei Dosierungsmengen  $< 100 \text{ kg/m}^3$  in Einzelfällen einen im Vergleich zum Nullbeton leicht sämigen Beton mit geringfügig verbesserten Verarbeitungseigenschaften. Die Unterschiede bei gleichen Soll-Zusammensetzungen waren jedoch erheblich. Daraus ist zu schließen, daß solche Betonzusammensetzungen sehr empfindlich für Fehldosierungen und insbesondere für einen unterschiedlichen Wassergehalt sind. Bei Dosierungen über  $100 \text{ kg/m}^3$  schlug der erhöhte Wasseranspruch negativ auf die Verarbeitbarkeit durch. Insgesamt scheinen die gröberen Zusatzstoffe (Quarzmehl und Natursande) etwas günstiger zu sein als das feinere Kalksteinmehl.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß eine zuverlässige Verbesserung der Verarbeitbarkeit nur durch hochwertige, glaskugelreiche Flugasche möglich ist.

### 6.2.3 Verdichtungswilligkeit

Die Verdichtungswilligkeit kann recht gut anhand der Vebewerte beurteilt werden, da die Vibrationszeit proportional der aufgebrachten Verdichtungsarbeit ist. Wie aus Bild 6.3 zu ersehen ist, besaßen die Betone mit Zusatzstoffmengen von  $50$  und  $100 \text{ kg/m}^3$  größenordnungsmäßig dieselbe Verdichtungswilligkeit wie die Nullbetone.

In höheren Dosierungen bewirkte die Flugasche A eine Verbesserung, während alle übrigen Zusatzstoffe eine Verminderung der Verdichtungswilligkeit zur Folge hatten. Diese Tendenz war bei den feinkörnigen Zusatzstoffen Traß und Kalksteinmehl am stärksten ausgeprägt. Auffällig ist auch der Unter-

schied zwischen den beiden Flugaschen. Alle Betone sind jedoch mit Rüttelgeräten zuverlässig zu verdichten.

Die Messungen der Vebe-Werte unmittelbar nach dem Mischen und nach 30 Minuten ließen erkennen, daß die Verdichtungs-willigkeit bei Zugabe der feinkörnigen Stoffe wie Flug-asche, Traß und Kalksteinmehl insbesondere bei hohen Do-sierungen mit der Zeit schneller abnimmt als bei den übr-i-gen Betonen.

#### 6.2.4 Vergleich: Mörtel - Beton

Vergleicht man die Bilder 4.17 und 6.3 miteinander, so sieht man, daß die Untersuchungen am Frischmörtel und am Frischbeton nicht in allen Fällen korrespondierende Ergebnisse lieferten. So zeigten die Mörtelversuche für Traß und Kalksteinmehl nicht die ansteifende Wirkung wie beim Beton, und bei den Versuchen mit den Natursanden er-gaben sich beim Mörtel steifere Konsistenzen als beim Be-ton. Eine Erklärung hierfür könnte in der Tatsache liegen, daß der Zusatzstoffanteil beim Mörtel 4,4 Gew.-% und beim Beton 2,1 - 8,3 Gew.-% betrug. Die Versuchsergebnisse er-lauben den Schluß, daß beim Mörtel die Kornform und beim Beton die Kornverteilung von größerem Einfluß auf die Ver-arbeitungseigenschaften sind.

### 6.3 Festbetoneigenschaften

#### 6.3.1 Druckfestigkeit

Wie aus Bild 6.4 zu ersehen ist, bewirkte die Zugabe der latenthyadraulischen Zusatzstoffe erwartungsgemäß eine Fe-stigkeitssteigerung. Diese betrug im Alter von 28 Tagen bei Dosierungsmengen von 50 - 100 kg/m<sup>3</sup> rund 10 N/mm<sup>2</sup> entspre-chend rund 25%, bei den höheren Dosierungsmengen etwa 5 N/mm<sup>2</sup>. Im Alter von 56 Tagen besaßen die Nullbetone aufgrund einer stärkeren Nacherhärtung die gleiche Druckfestigkeit wie die meisten Betone mit latenthyadraulischen Zusatzstoffen. Nur

die Betone mit hochdosierter Flugasche A lagen in der Druckfestigkeit  $\beta_{W56}$  um rund  $5 \text{ N/mm}^2$  höher als die Nullbetone.

Die übrigen Betonzusatzstoffe beeinflussten die Druckfestigkeit nicht signifikant.

#### 6.3.2 Biegezug- und Spaltzugfestigkeit

Die Zugabe von latenthdraulischen Zusatzstoffen bewirkte nahezu unabhängig von der Dosierungsmenge einen Anstieg der Biegezugfestigkeit um rund  $0,5 \text{ N/mm}^2$  entsprechend etwa 10%. Die Spaltzugfestigkeit wurde weniger signifikant beeinflusst.

Die übrigen Zusatzstoffe hatten keinen erkennbaren tendenziellen Einfluß auf die Biegezug- und Spaltzugfestigkeit.

#### 6.3.3 Elastizitätsmodul

Der Druckelastizitätsmodul wurde durch die Zusatzstoffe nicht signifikant beeinflusst. Er betrug im Mittel  $30400 \text{ N/mm}^2$  und lag damit deutlich unter dem nach DIN 1045 für diese Festigkeitsklasse (B 35) angegebenen Rechenwert von  $34000 \text{ N/mm}^2$ .

#### 6.3.4 Wassereindringtiefe

Die Nullbetone wiesen bereits eine vergleichsweise geringe Wassereindringtiefe von im Mittel 2 cm auf. Im Sinne der DIN 1045 gelten sie damit als wasserundurchlässig. Wie aus Tabelle 6.2 zu ersehen ist, beeinflussten die Zusatzstoffe die Wassereindringtiefe nur geringfügig, in der Tendenz jedoch positiv. Höhere Dosierungsmengen wirkten sich ebenfalls günstig aus.

#### 6.3.5 Frost-Tausalz-Widerstand

Auf Bild 6.5 ist der Volumenverlust der Versuchsbetone in Abhängigkeit von der Frostwechselzahl aufgetragen. Mit einem Volumenverlust von 23-30% nach 50 Frost-Tau-Wechseln ist der Frost-Tausalz-Widerstand der Nullbetone im Vergleich zu Luftporenbetonen gering.

Die Betone mit Gesteinsmehl- und Natursandzusätzen lagen im Streuband der Nullbetone. Die Betone mit Flugasche lassen eine geringfügige Verlangsamung des Frostzerfalls erkennen.

Beim Beton mit Traßzusatz ( $100 \text{ kg/m}^3$ ) betrug der Volumenverlust nach 50 Frost-Tau-Wechseln mit 11% weniger als die Hälfte der Nullbetone.

#### 6.3.6 Vergleich: Mörtel-Beton

Beim Vergleich der Druck- und Biegezugfestigkeiten von Mörtel und Beton ist zu bedenken, daß beim Mörtel ein Teil des Zements durch Zusatzstoff ersetzt wurde, wodurch sich der Wasserzementwert von 0,5 auf 0,625 vergrößerte; bei den Betonversuchen dagegen blieb der Wasserzementwert konstant. Beide Versuchsarten ergaben eine Festigkeitssteigerung durch die Zugabe von latentlydraulischen Zusatzstoffen und keine signifikante Beeinflussung durch andere Zusatzstoffe. Die Mörtelversuche lieferten somit übertragbare Versuchsergebnisse.

### 7. Zusammenfassung

Mit latentlydraulischen Zusatzstoffen, Gesteinsmehlen und Natursanden wurden vergleichende Mörtel- und Betonversuche durchgeführt. Es ergab sich, daß Mörtelversuche zur Vorhersage der Frischbetoneigenschaften weniger gut als zur Vorhersage der Festbetoneigenschaften geeignet sind. Erwartungsgemäß ließen sich durch die Zugabe von latentlydrau-

lischen Stoffen Festigkeitsgewinne erzielen, wobei jedoch beträchtliche Qualitätsunterschiede die Notwendigkeit von Eignungsprüfungen unterstrichen.

Flugaschen sollten möglichst feinkörnig und einen Glaskugelanteil über 90% besitzen. Nur mit solchen Flugaschen ist auch eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Beton zu erreichen.

Traß kann zwar eine Steigerung der Betondruckfestigkeit und als einziger Zusatzstoff auch eine Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes bewirken, er verschlechtert die Verarbeitbarkeit jedoch erheblich.

Gesteinsmehle und Natursande sind nicht geeignet, die Frisch- oder Festbetoneigenschaften zu verbessern, günstigenfalls sind sie ohne signifikanten Einfluß und können daher ggf. aus wirtschaftlichen Gründen als Ersatz für einen Teil des Zuschlags eingesetzt werden, wobei Eignungsprüfungen unerlässlich sind. Ein Mehlkorngehalt bis zu  $600 \text{ kg/m}^3$  erscheint vertretbar. Höhere Mehlkormengen erfordern jedoch einen zunehmenden Verdichtungs- aufwand.



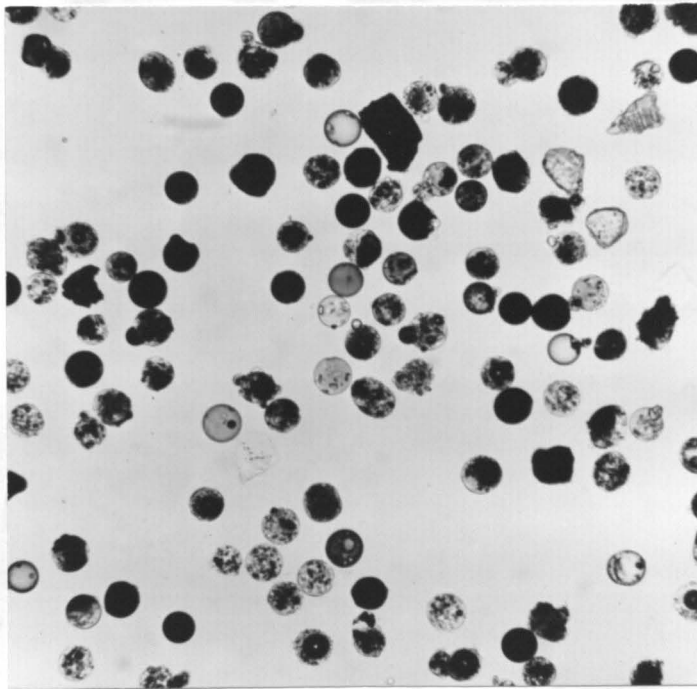


Bild 3.1: Flugasche A, Vergrößerung rd. 100:1  
Kornform: gut gerundet

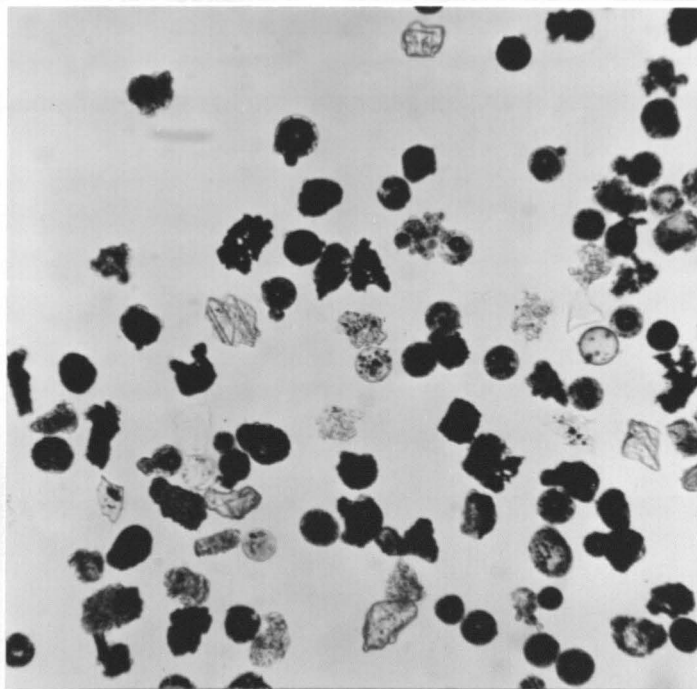


Bild 3.2: Flugasche B, Vergrößerung rd. 100:1  
Kornform: gerundet

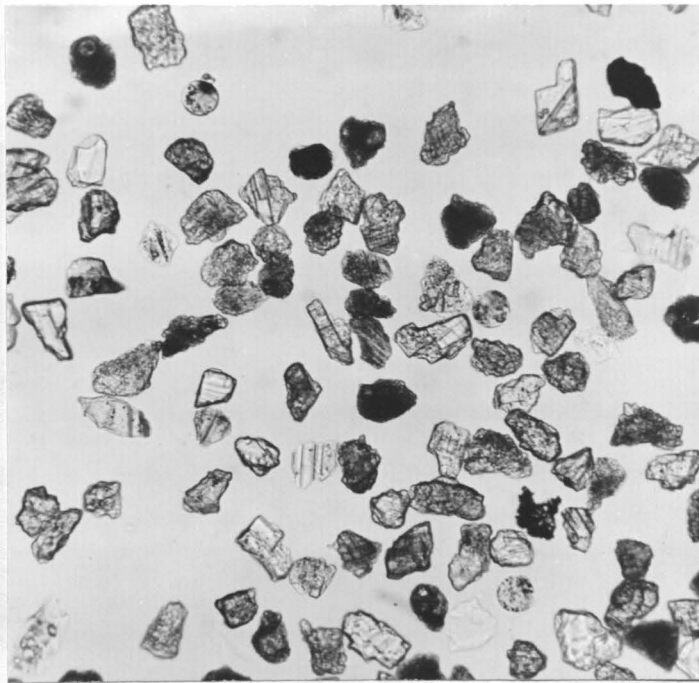


Bild 3.3: Traß, Vergrößerung rd. 100:1  
Kornform: angular

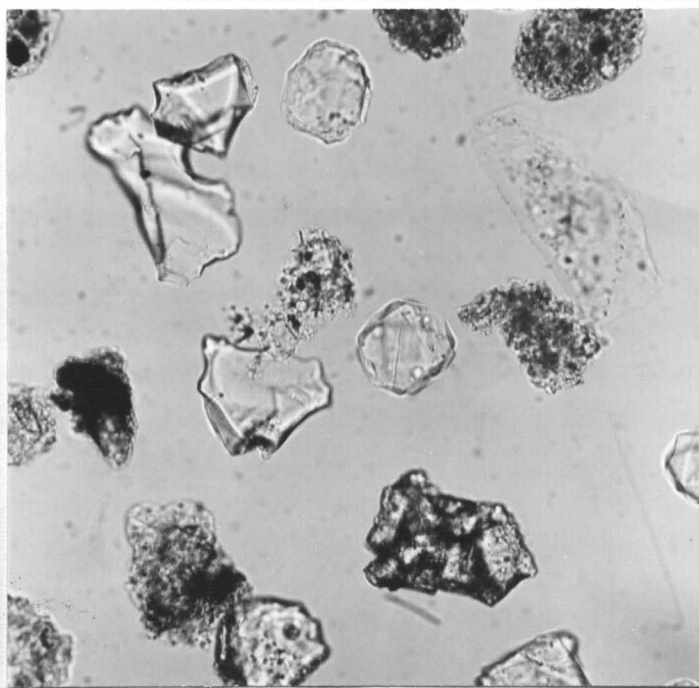


Bild 3.4: Traß, Vergrößerung rd. 300:1  
Kornform: angular

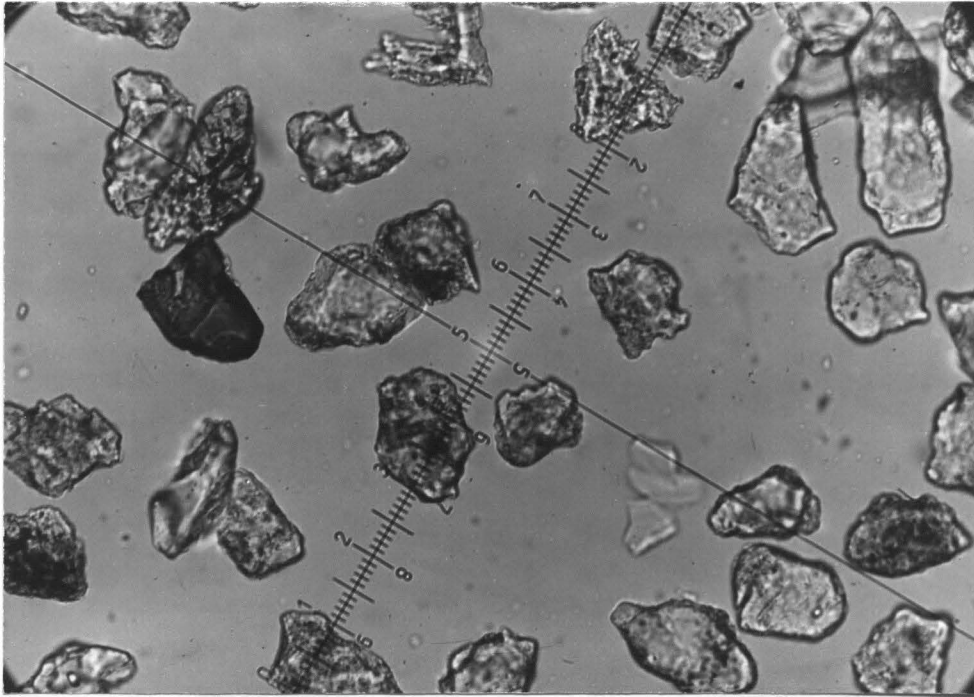


Bild 3.7: Sand A, Vergrößerung rd. 250:1  
Kornform: subangular/angerundet

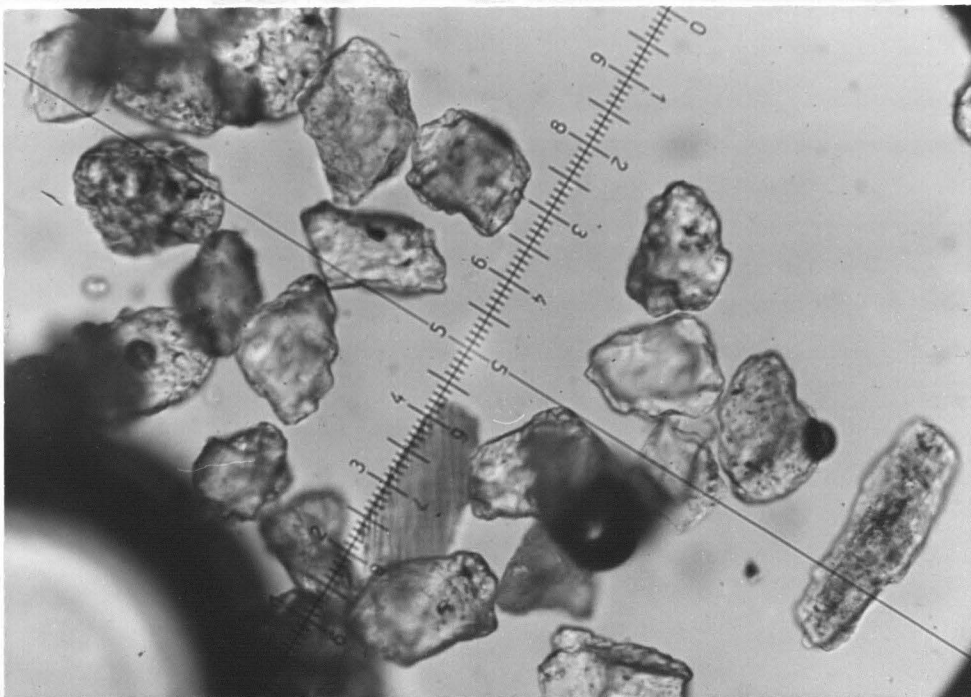


Bild 3.8: Sand B, Vergrößerung rd. 250:1  
Kornform: subangular/angerundet



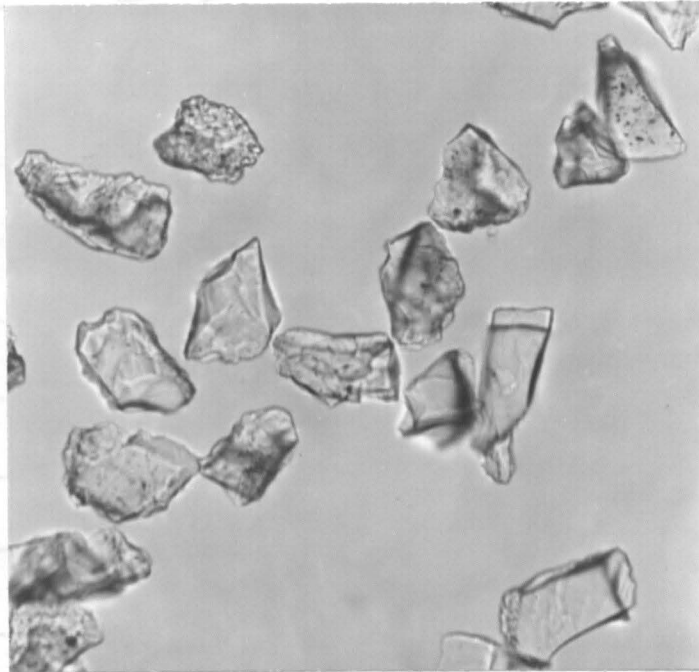


Bild 3.5: Quarzmehl, Vergrößerung rd. 300:1

Kornform: subangular

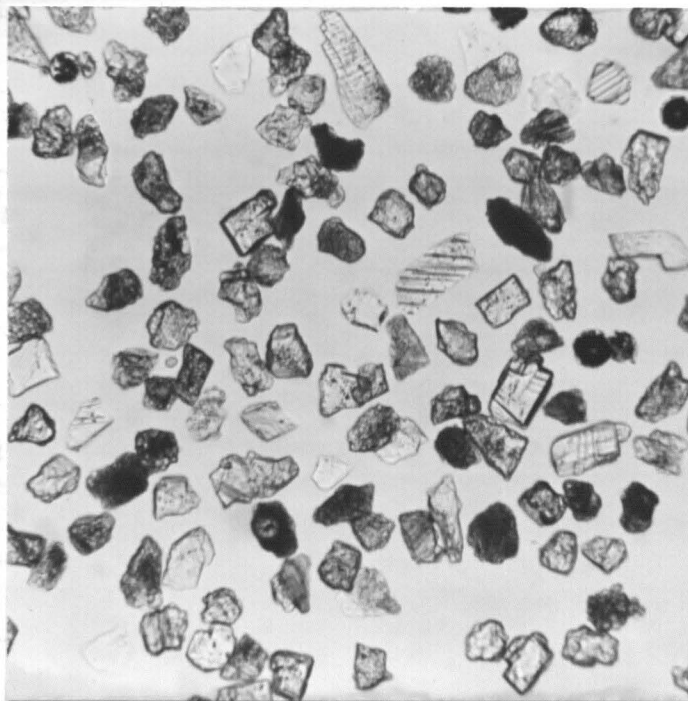


Bild 3.6: Kalksteinmehl, Vergrößerung rd. 100:1

Kornform: angerundet

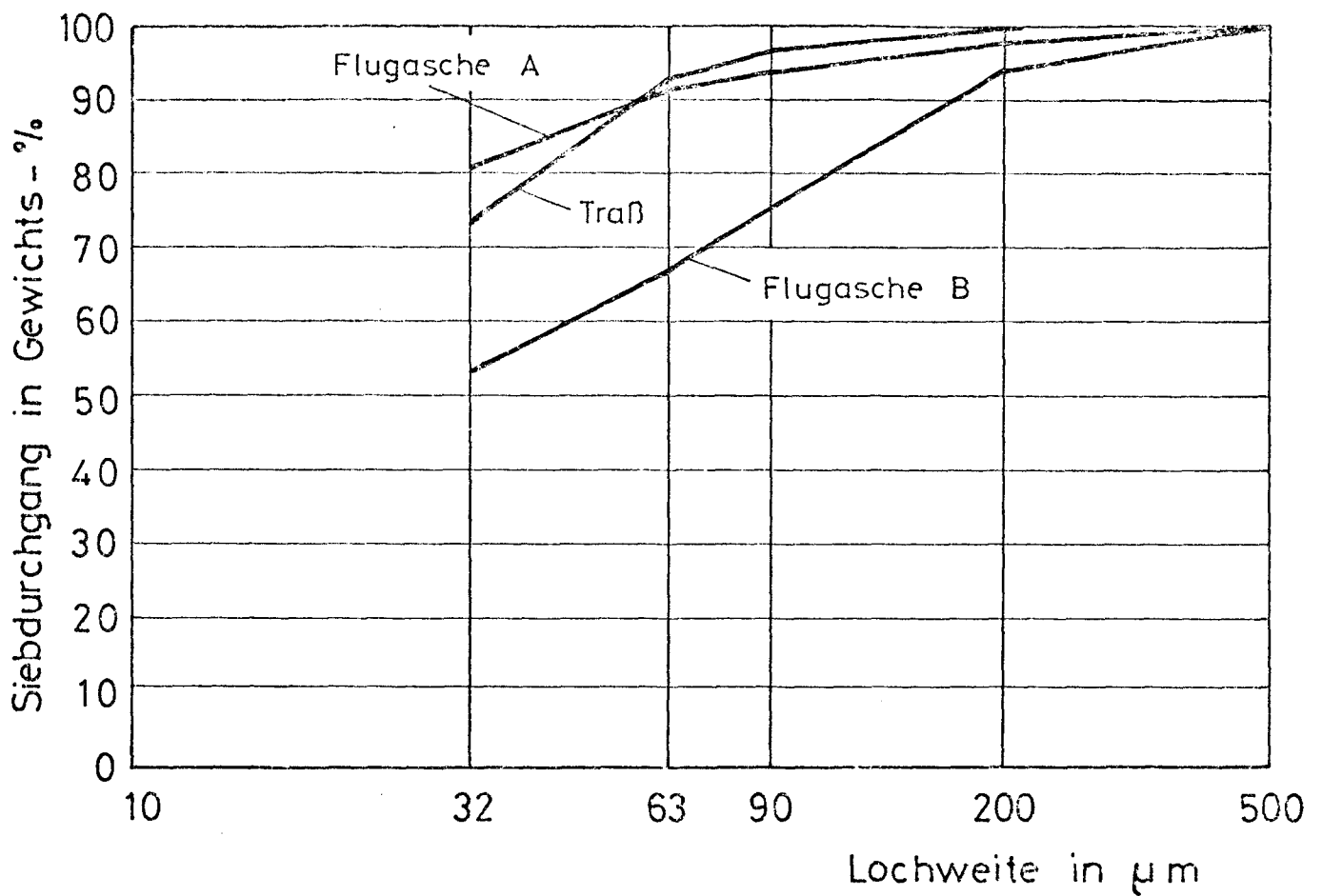


Bild 3.9: Sieblinien der latenthyadraulischen Zusatzstoffe

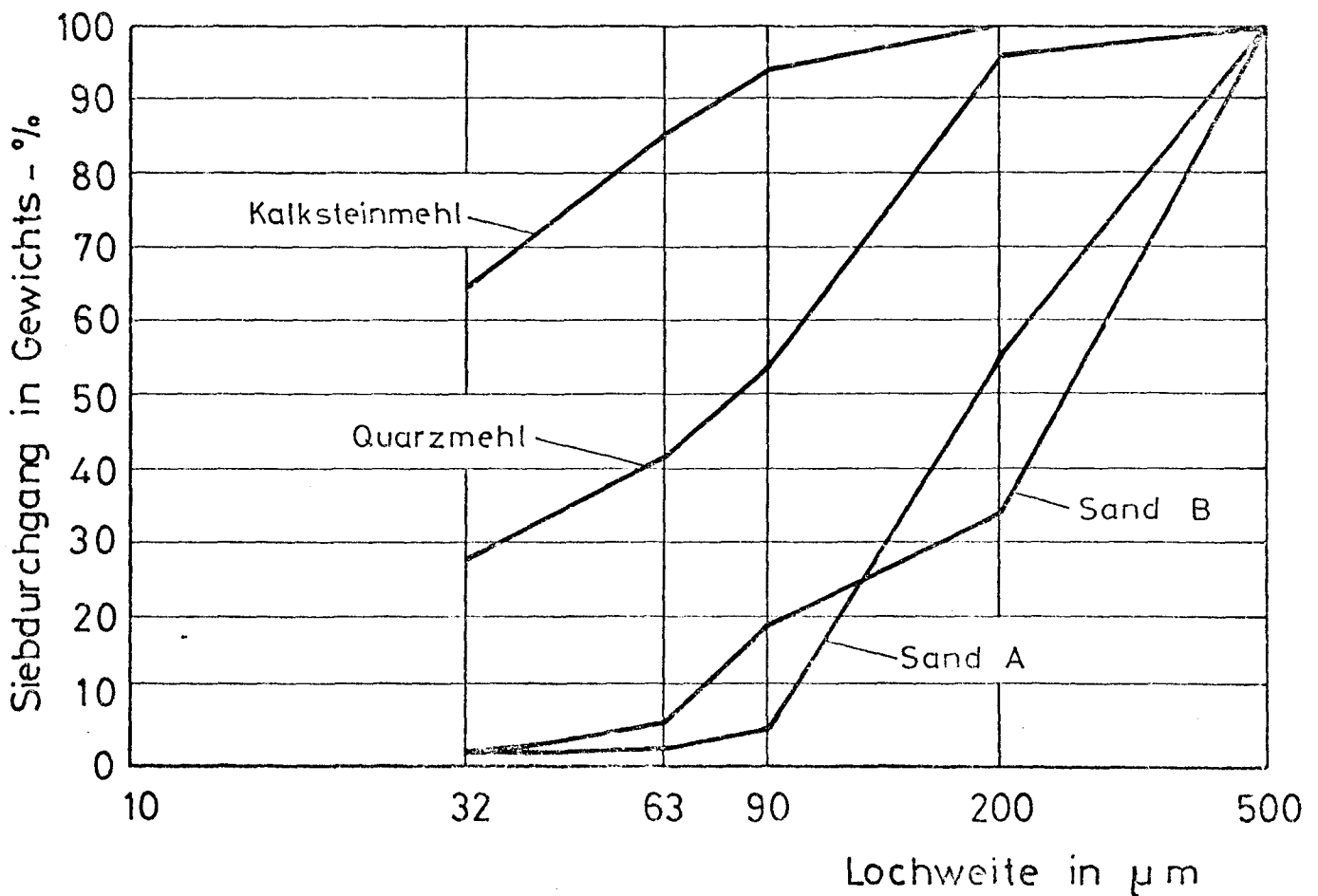


Bild 3.10: Sieblinien der Gesteinsmehle und Natursande

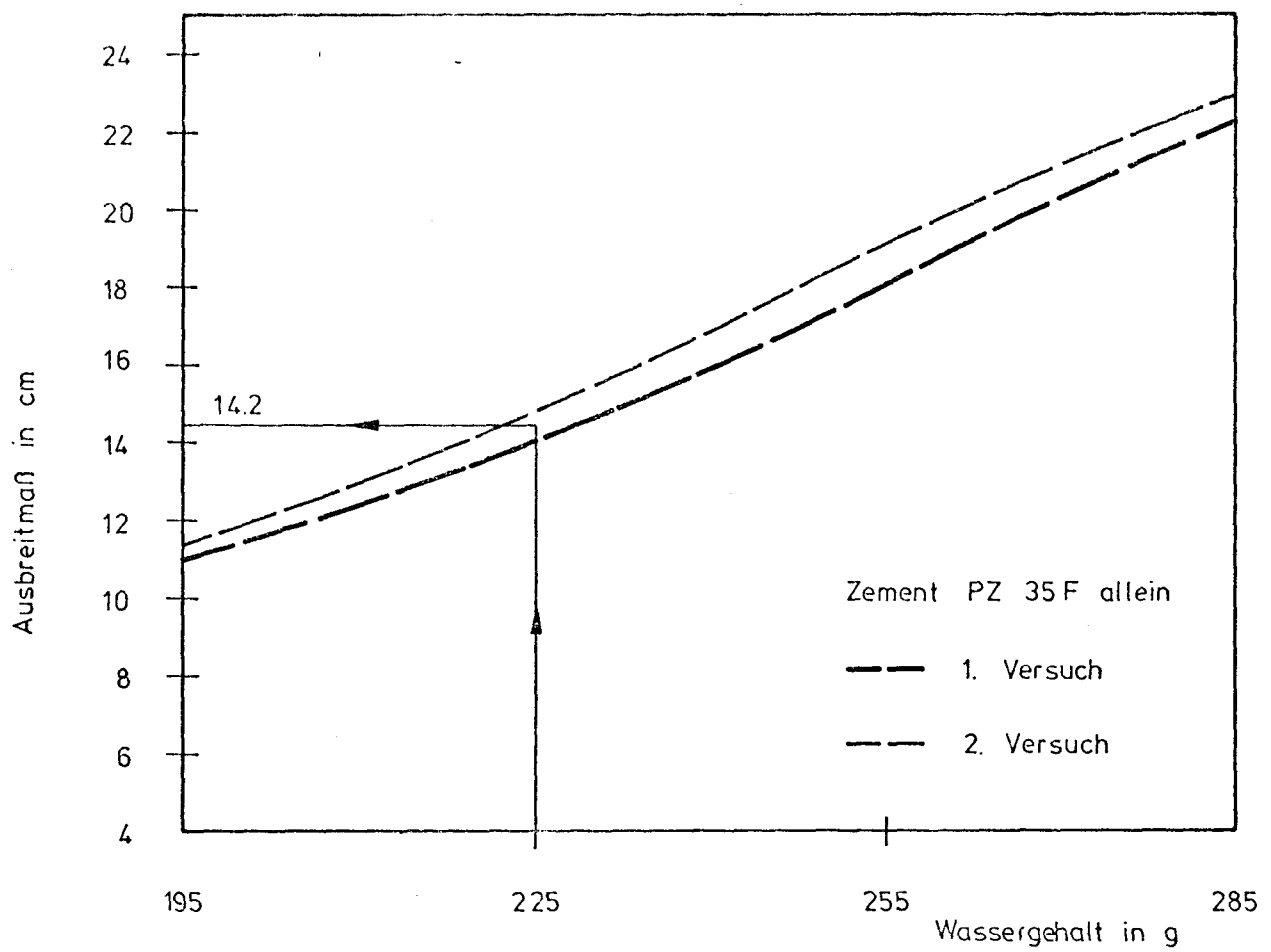


Bild 4.1

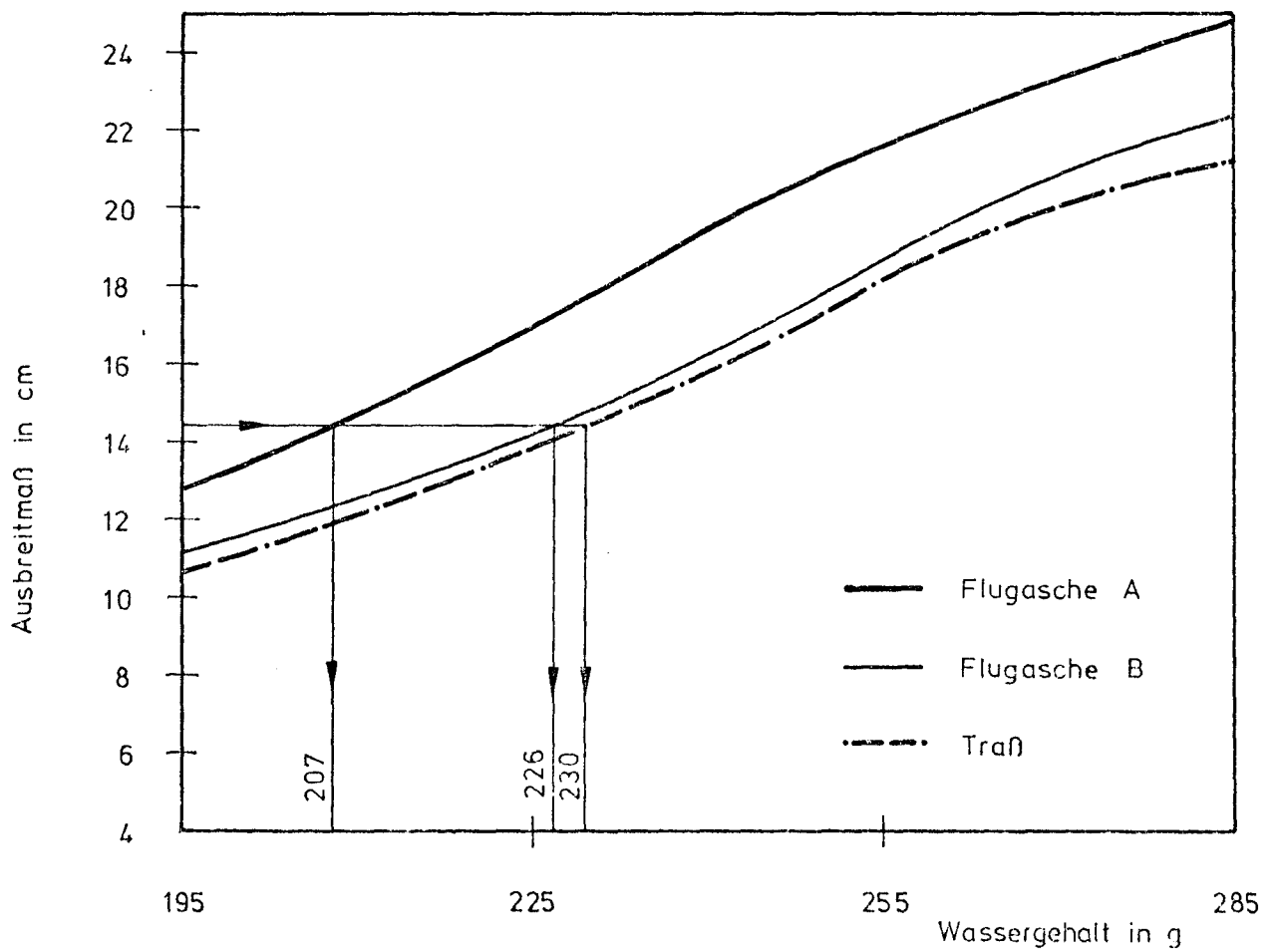
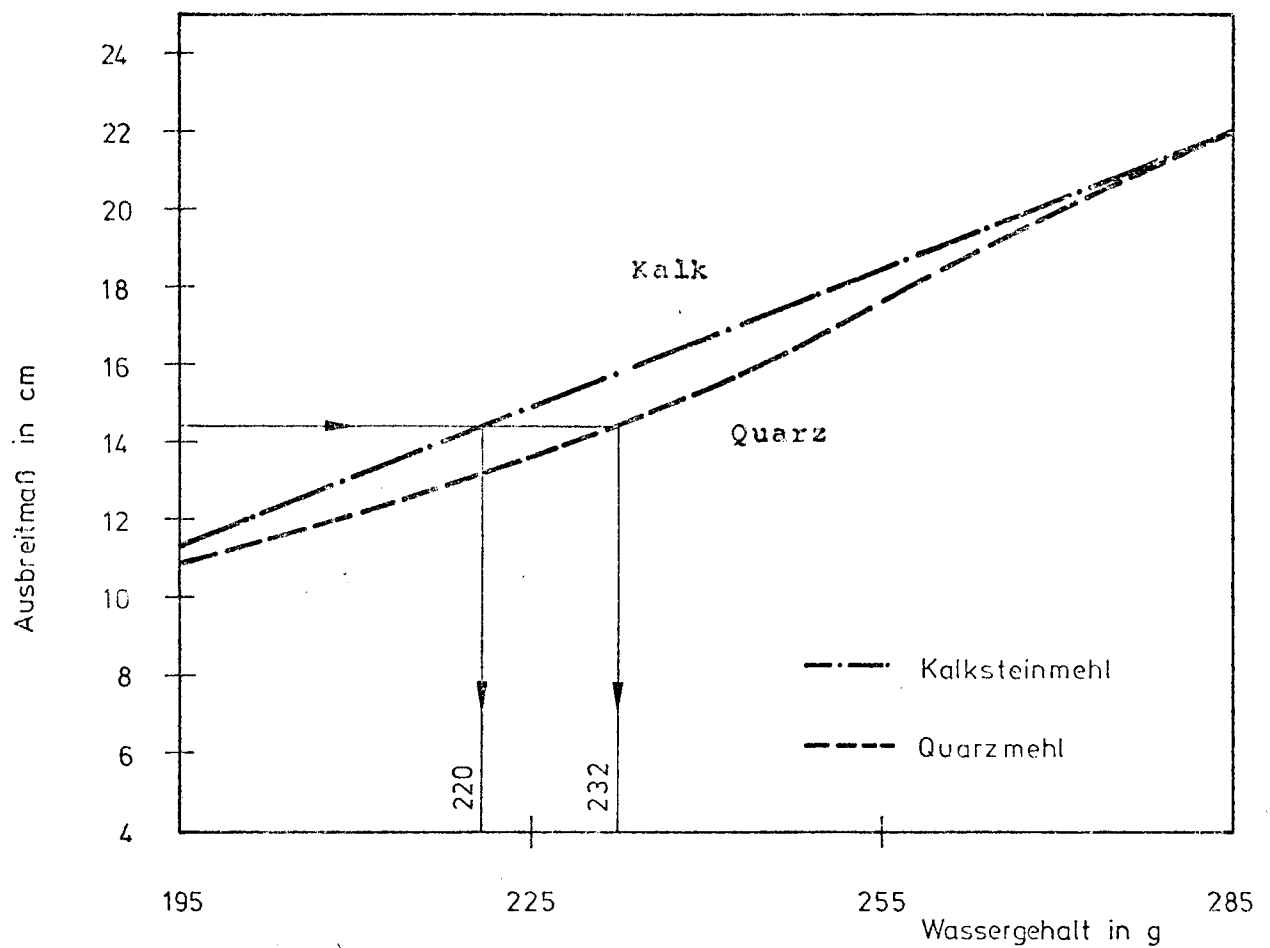
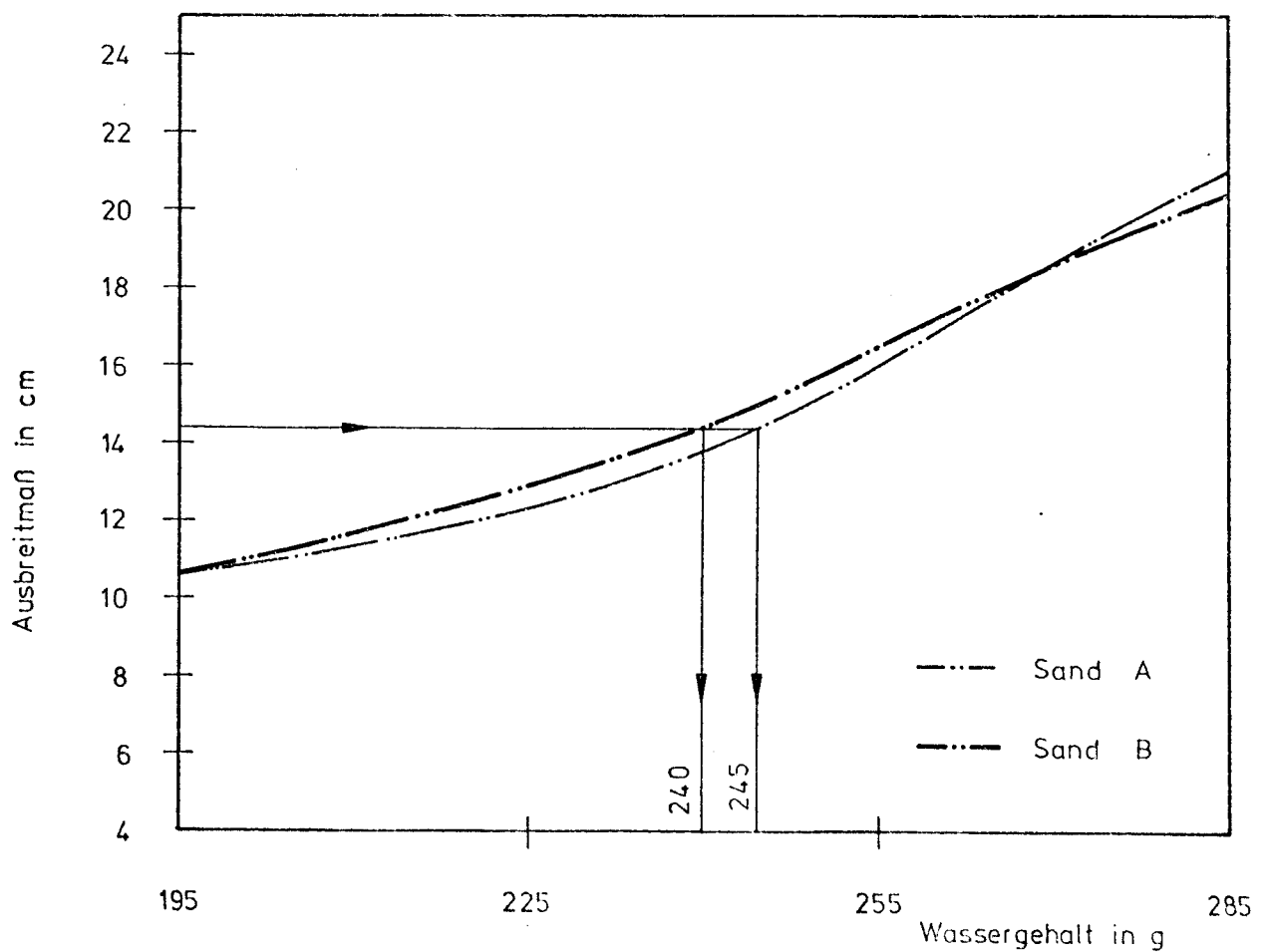


Bild 4.2

Mörtelversuche: Ausbreitmaß als Funktion des Wassergehaltes



**Bild 4.3**



**Bild 4.4**

**Mörtelversuche: Ausbreitmaß als Funktion des Wassergehaltes**

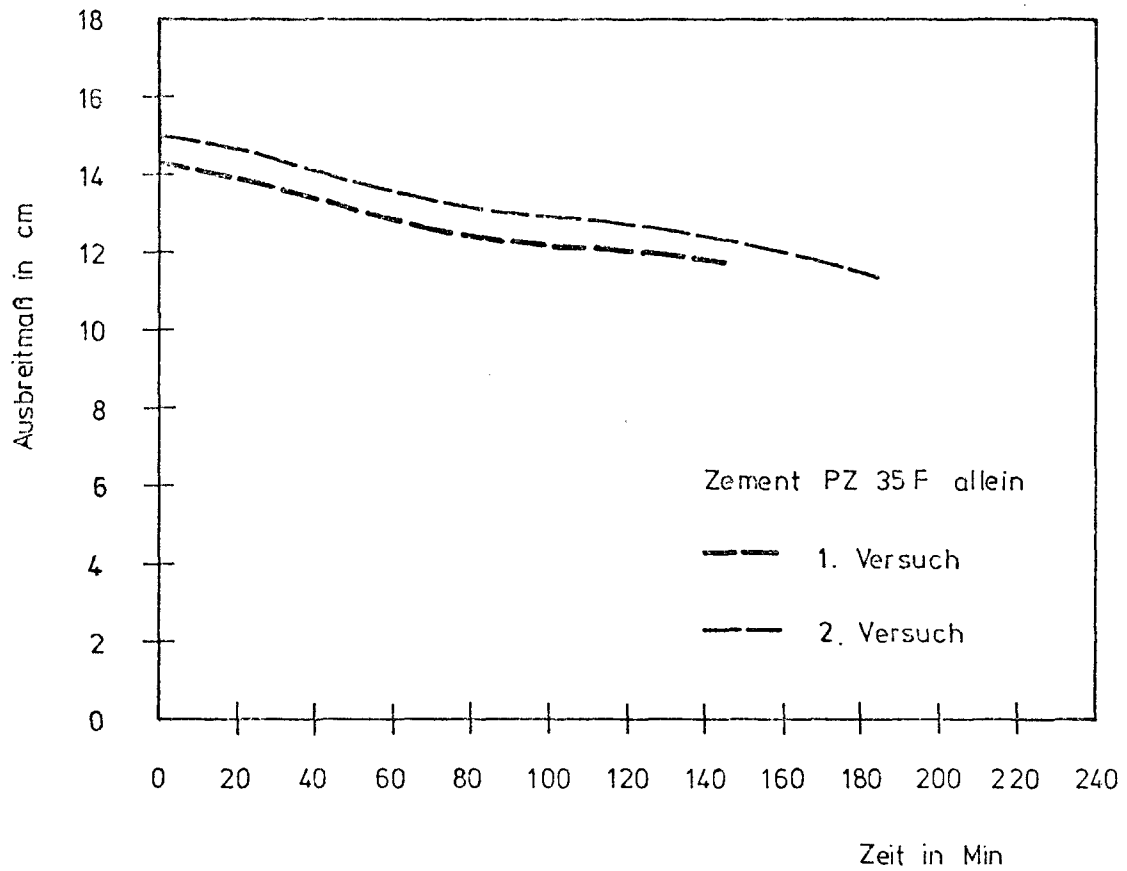


Bild 4.5

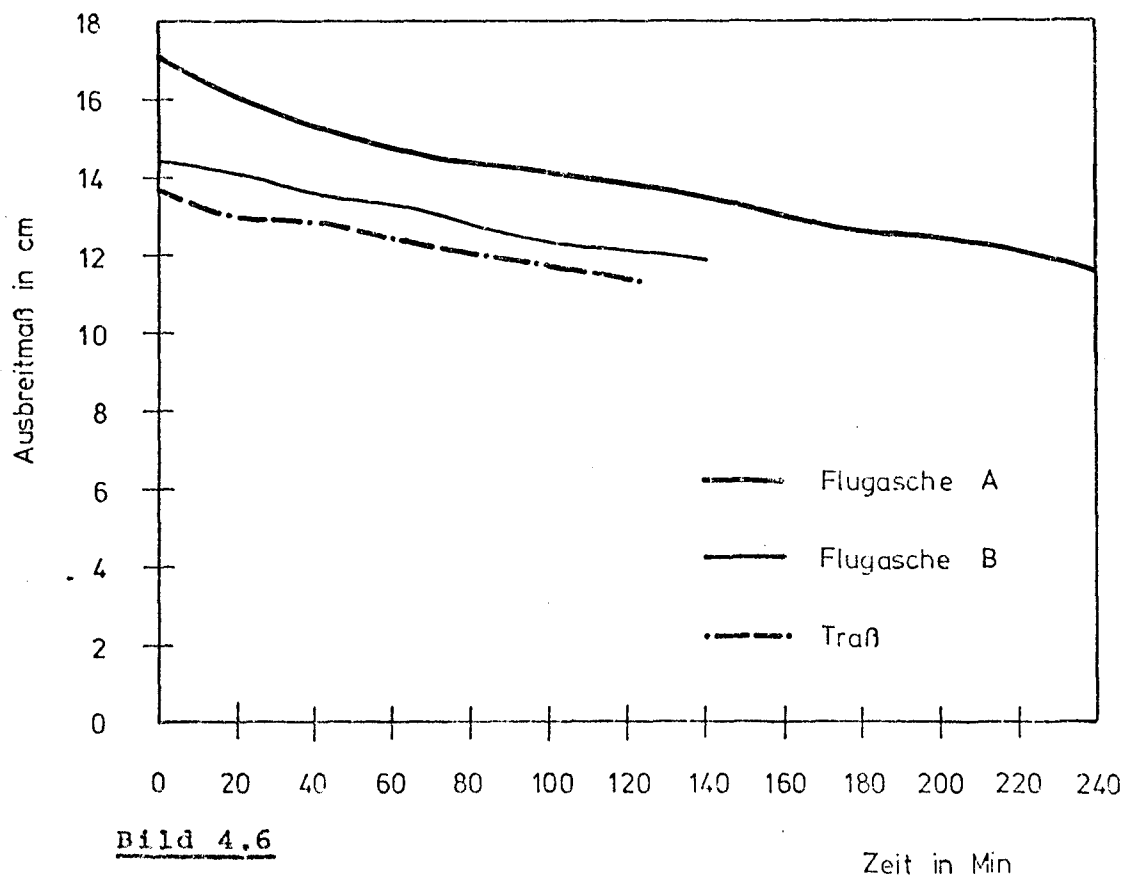


Bild 4.6

Mörtelversuche: Ausbreitmaß als Funktion der Zeit



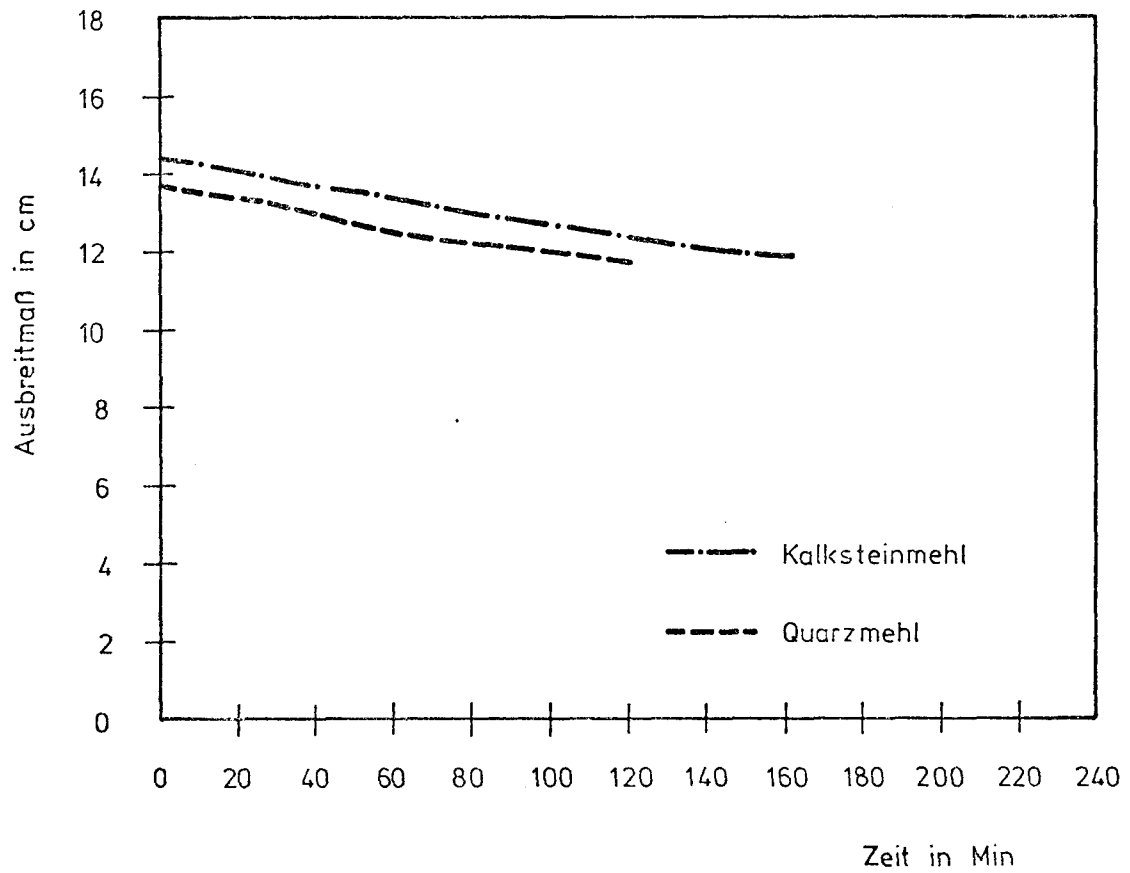


Bild 4.7

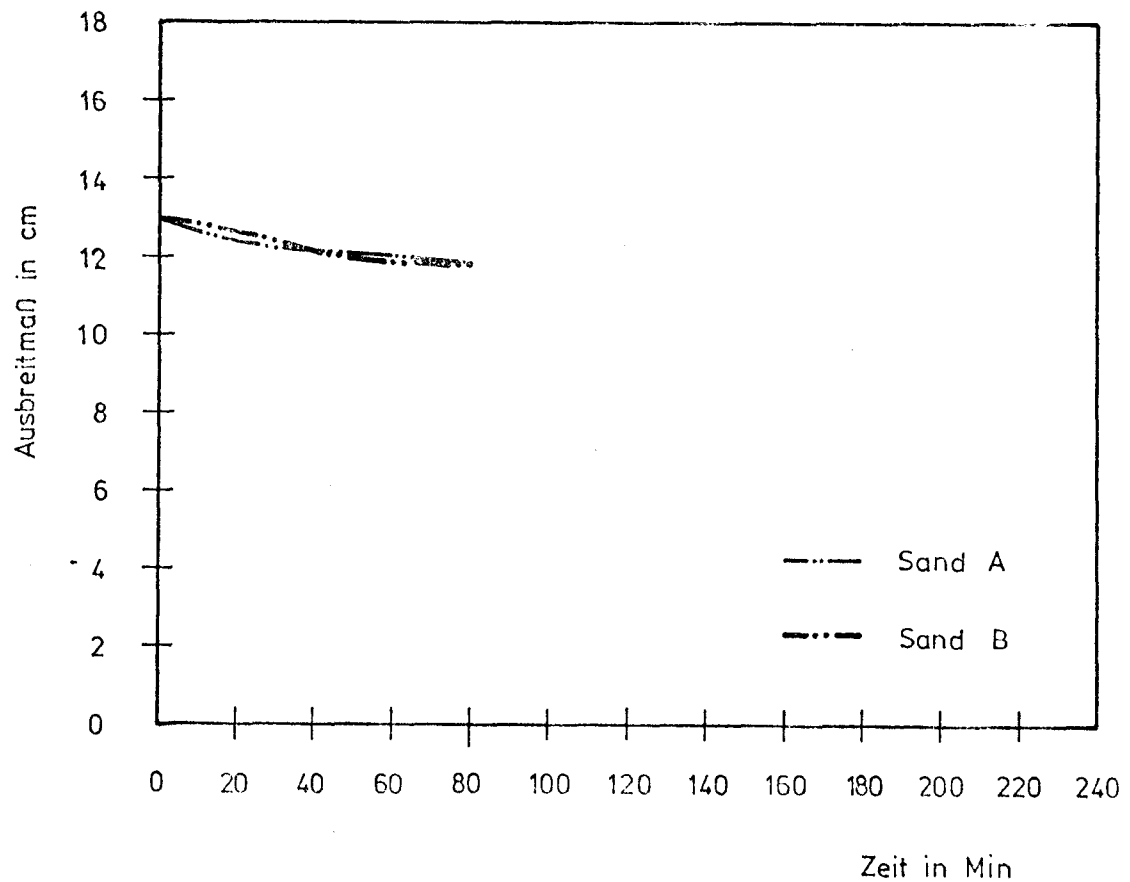


Bild 4.8

Mörtelversuche: Ausbreitmaß als Funktion der Zeit

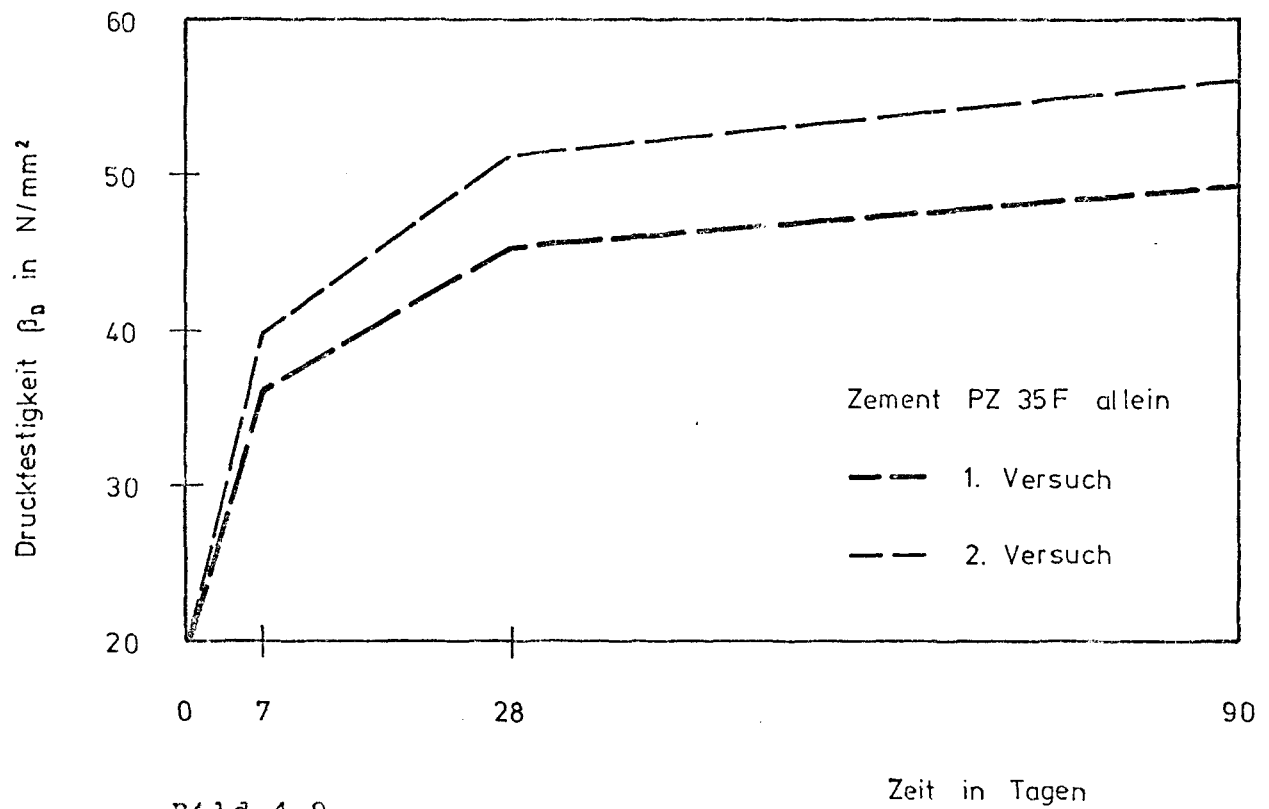


Bild 4.9

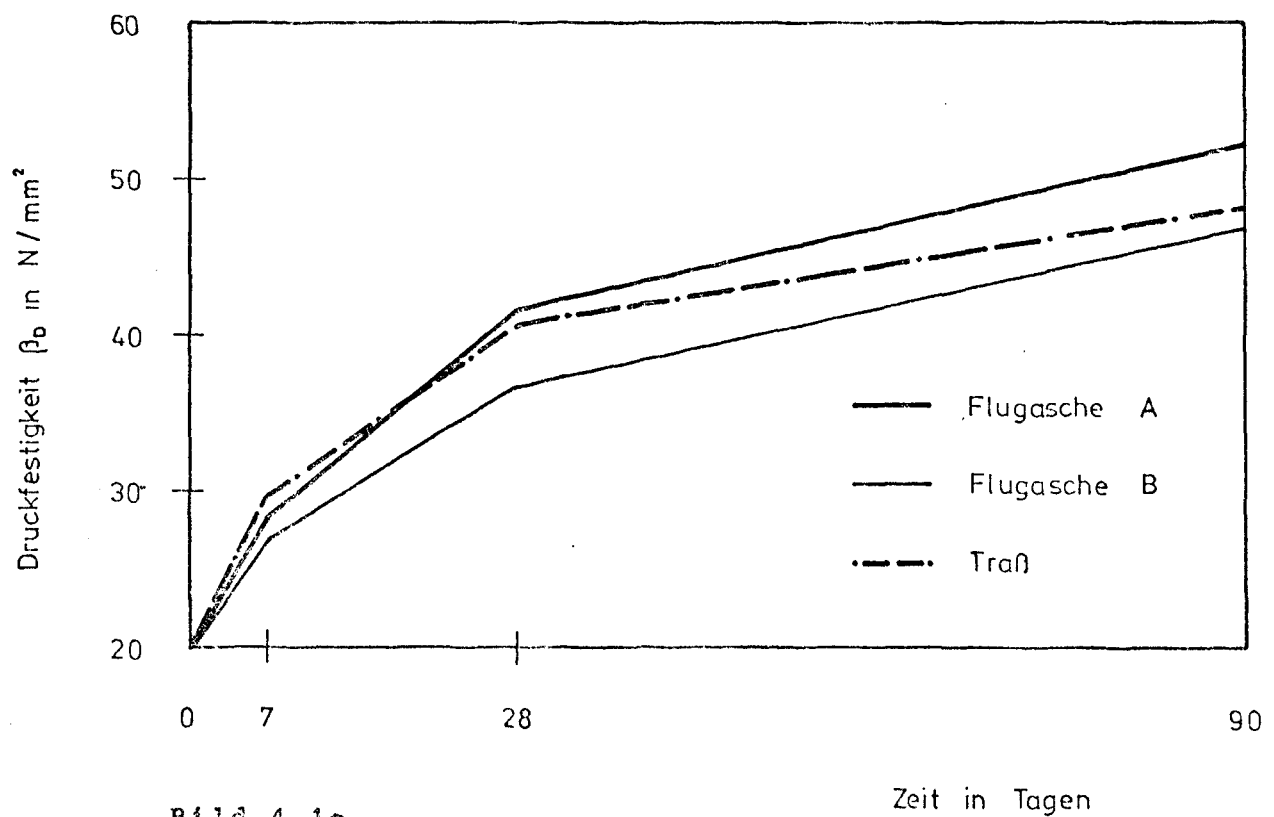


Bild 4.10

Mörtelversuche: Druckfestigkeit als Funktion der Zeit

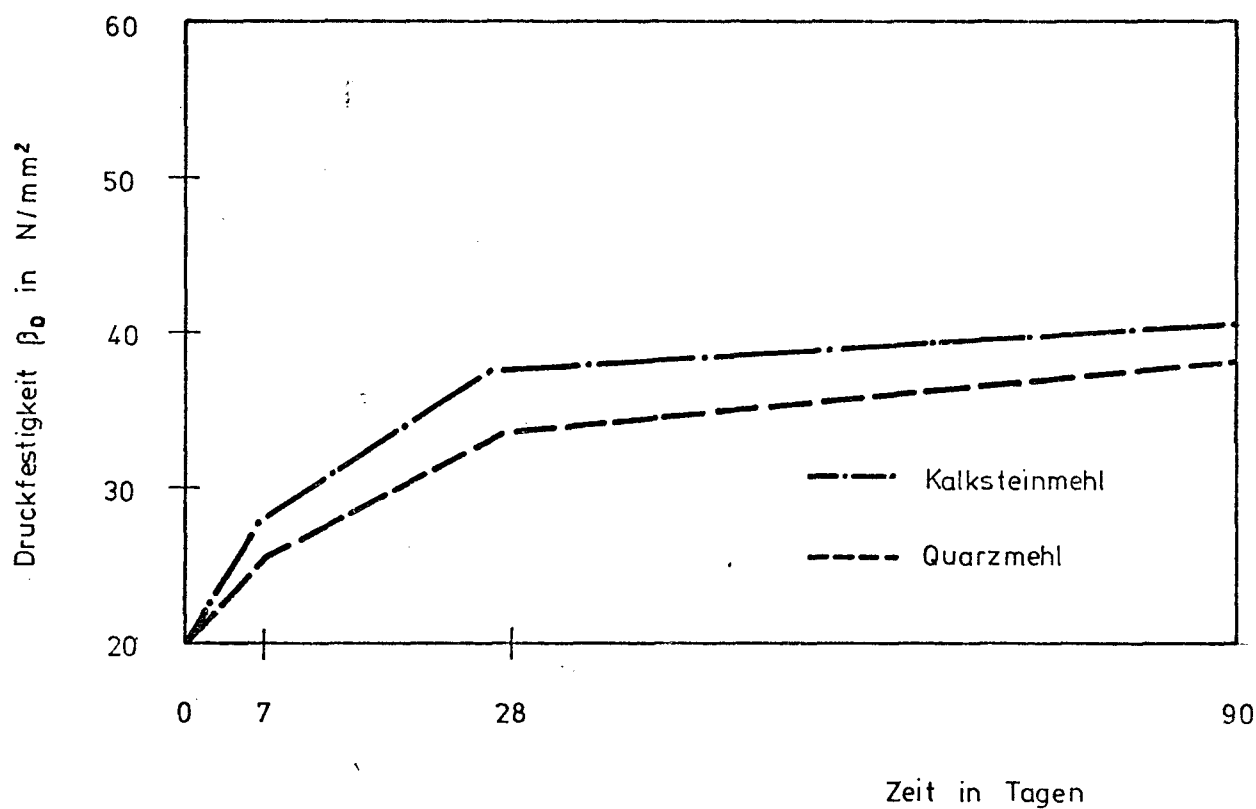


Bild 4.11

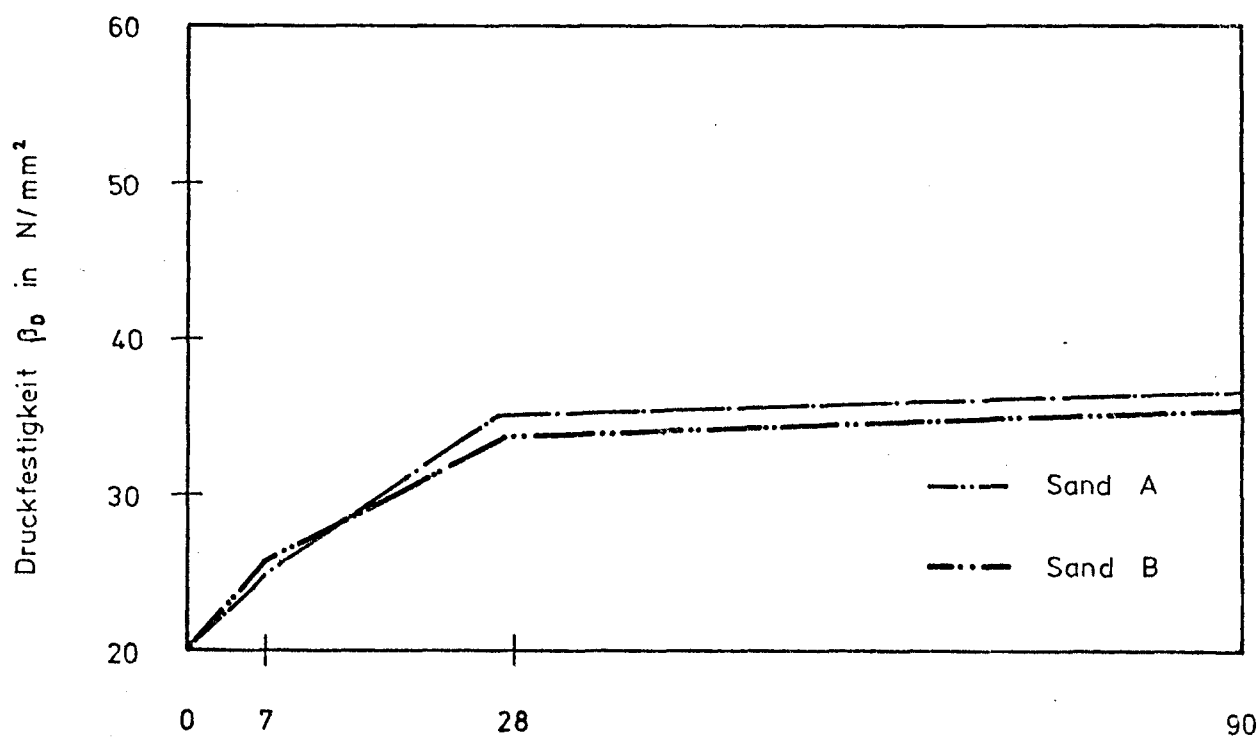
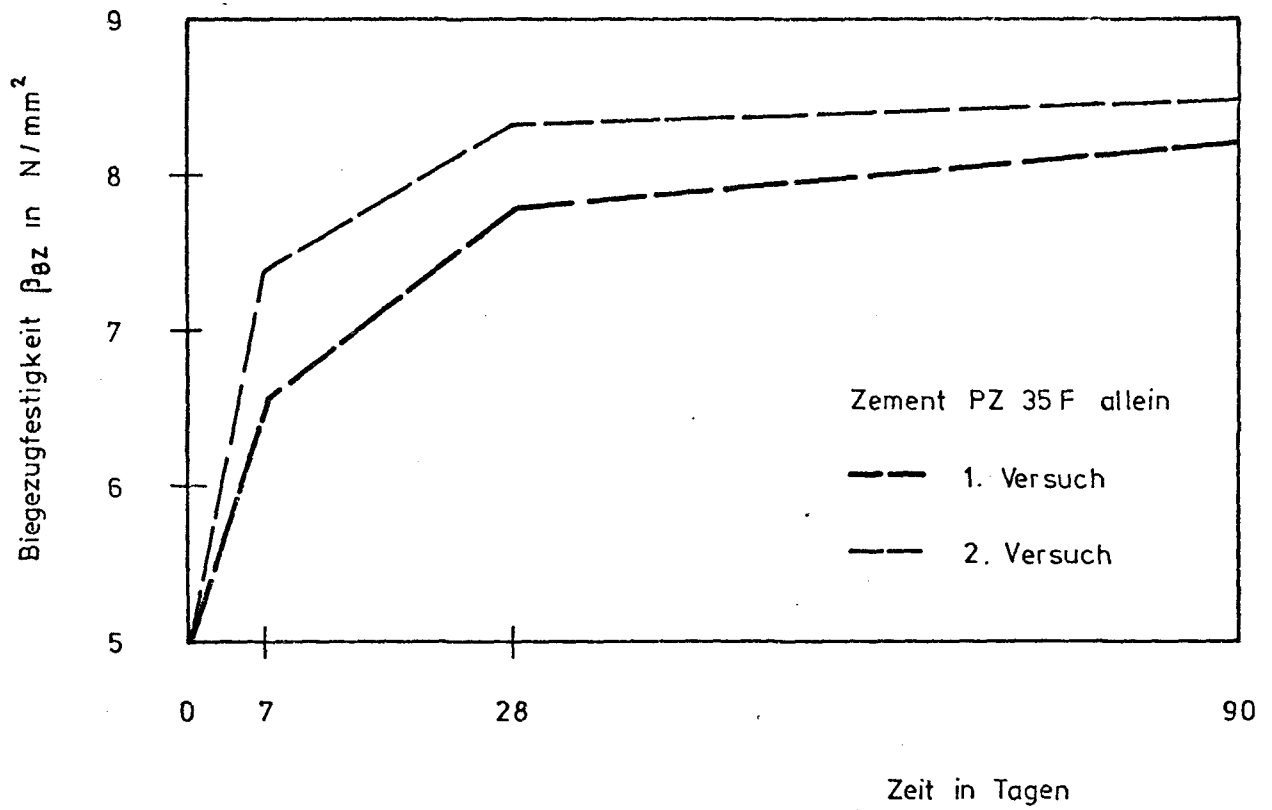
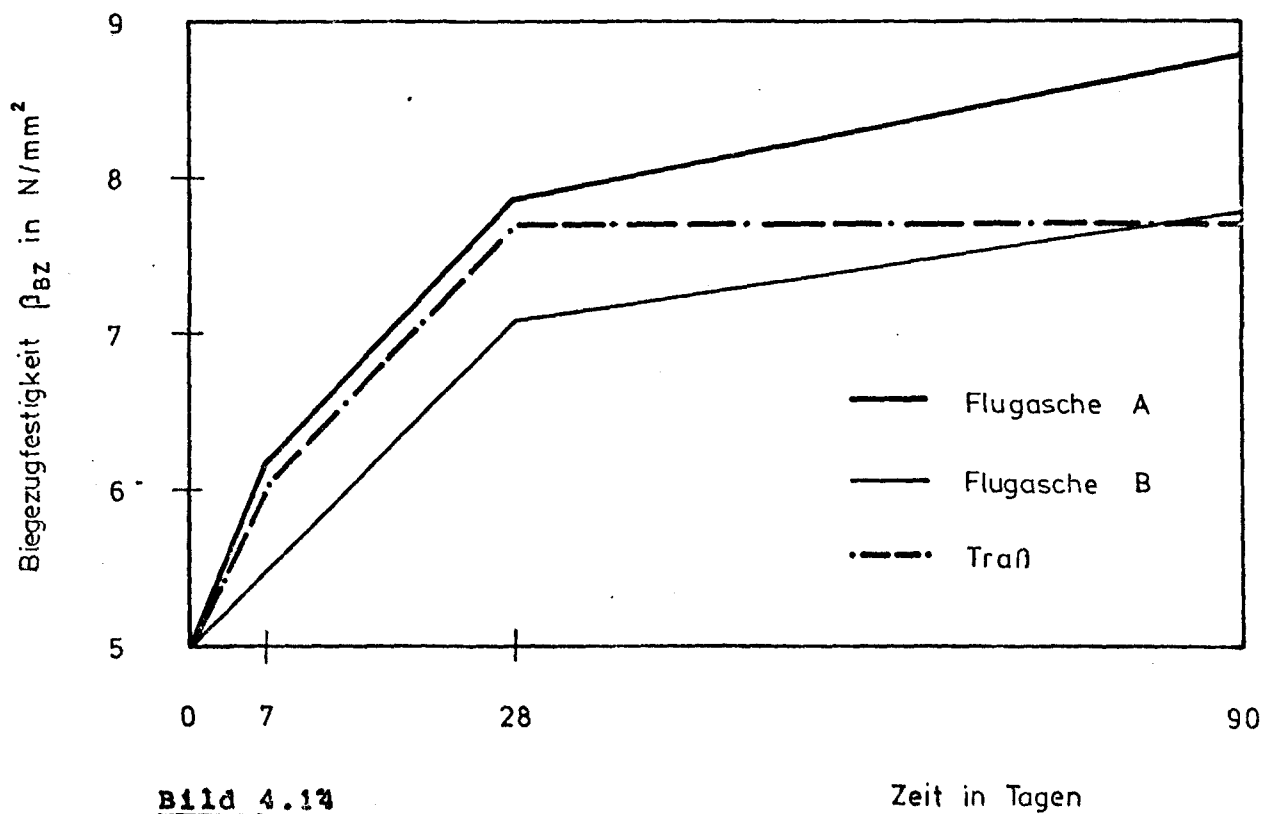


Bild 4.12

Mörtelversuche: Druckfestigkeit als Funktion der Zeit

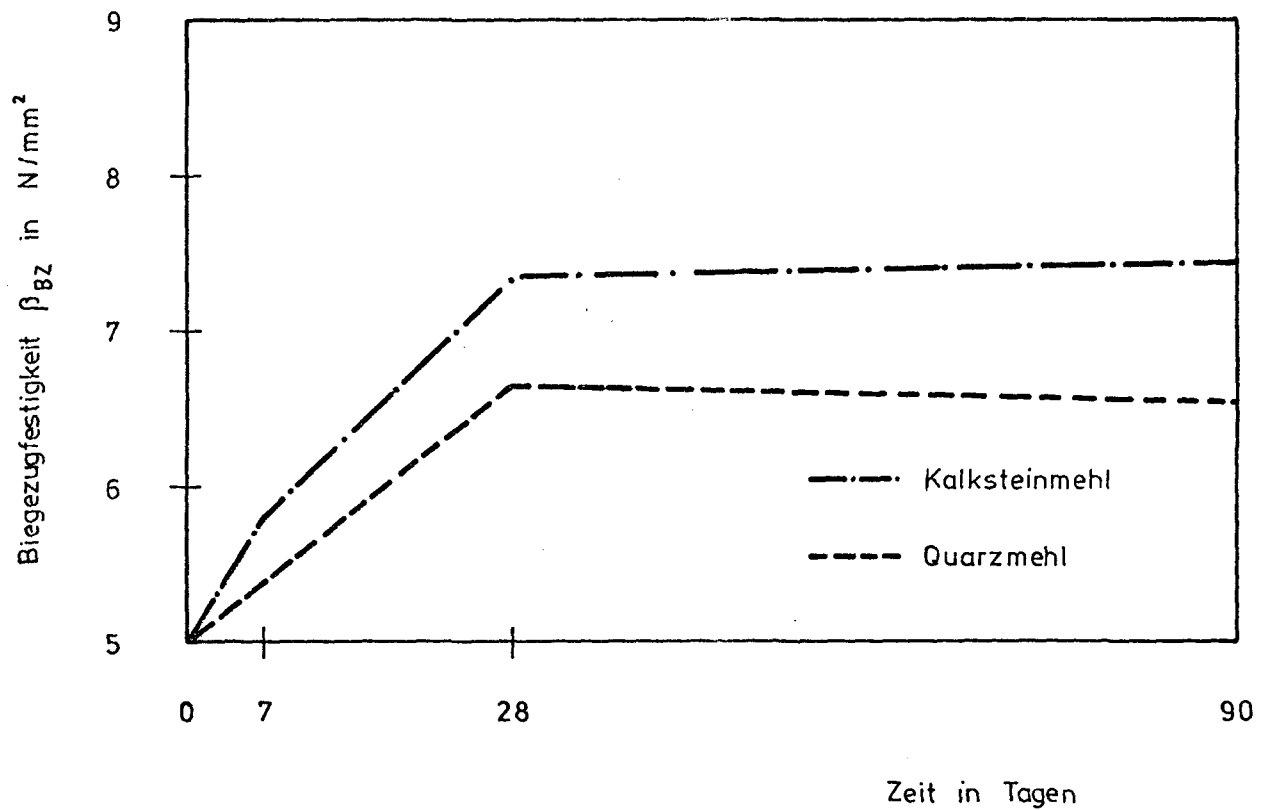


**Bild 4.13**

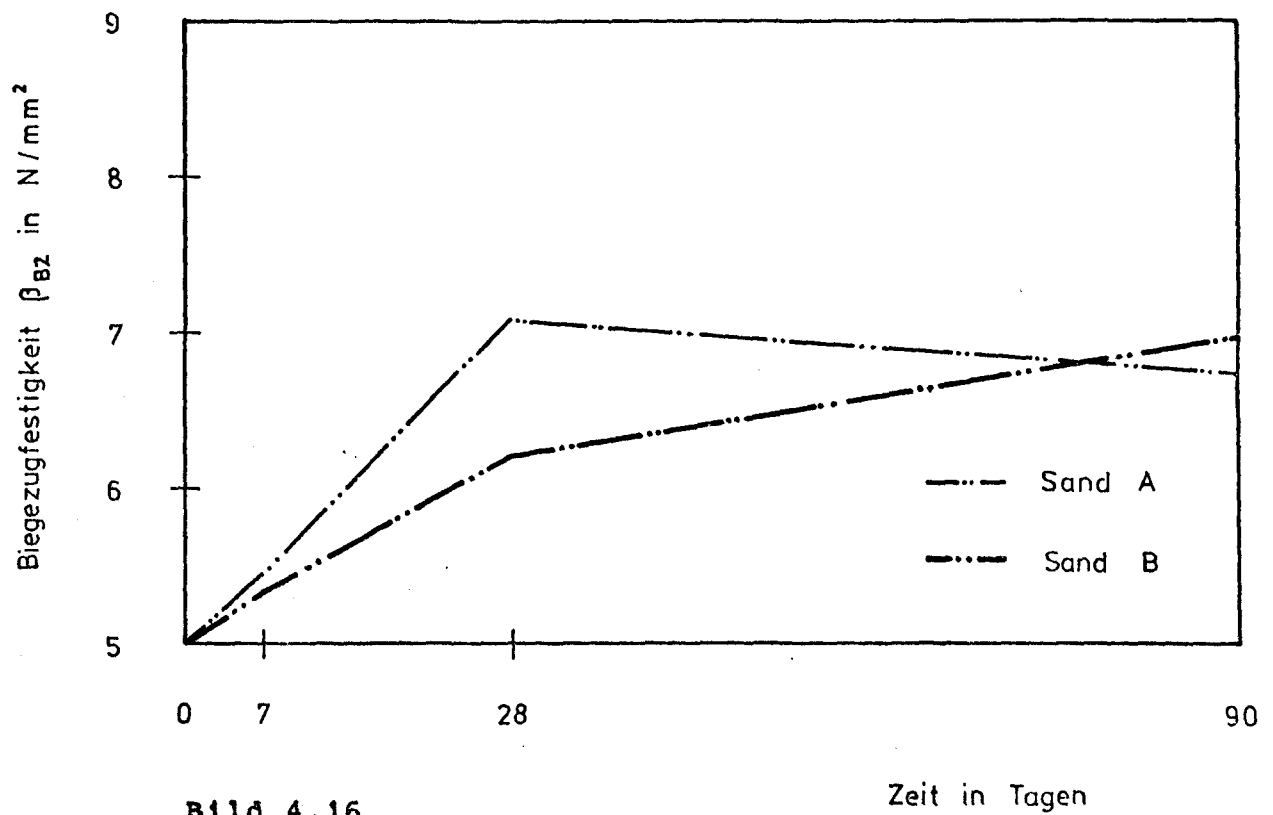


**Bild 4.14**

**Mörtelversuche: Biegezugfestigkeit als Funktion der Zeit**



**Bild 4.15**



**Bild 4.16**

**Mörtelversuche: Biegezugfestigkeit als Funktion der Zeit**

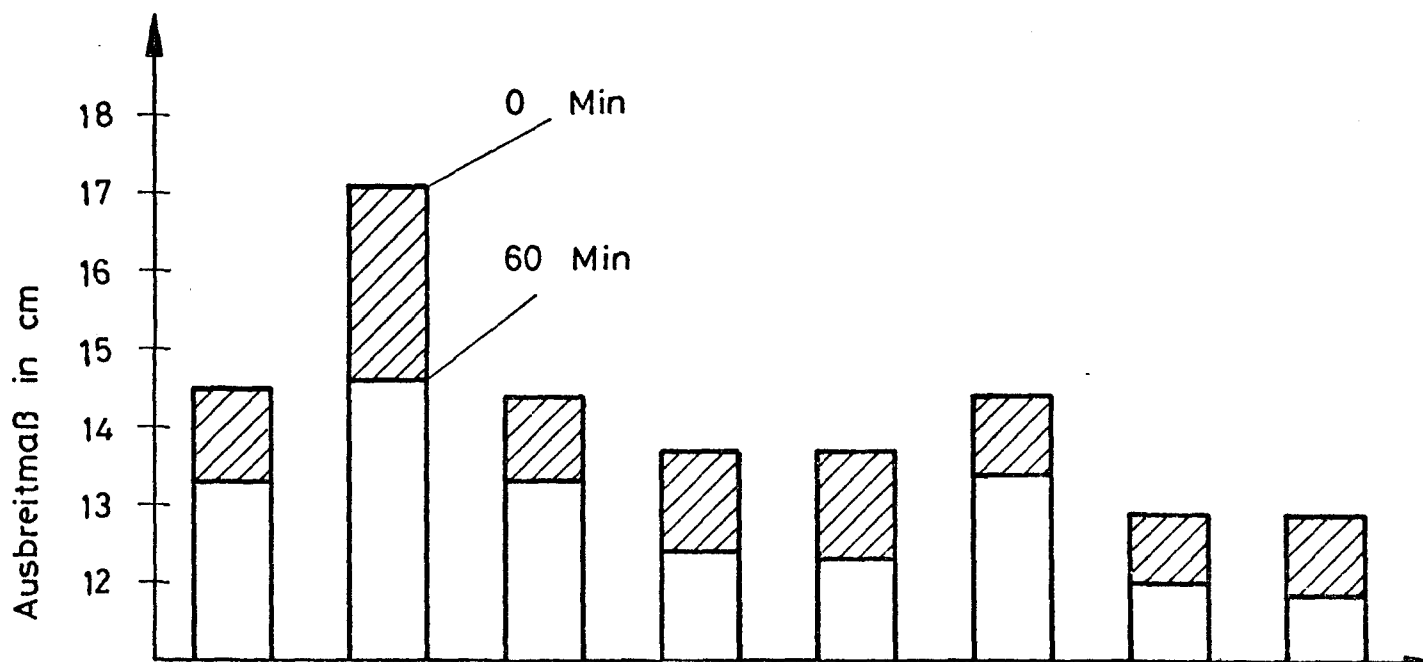
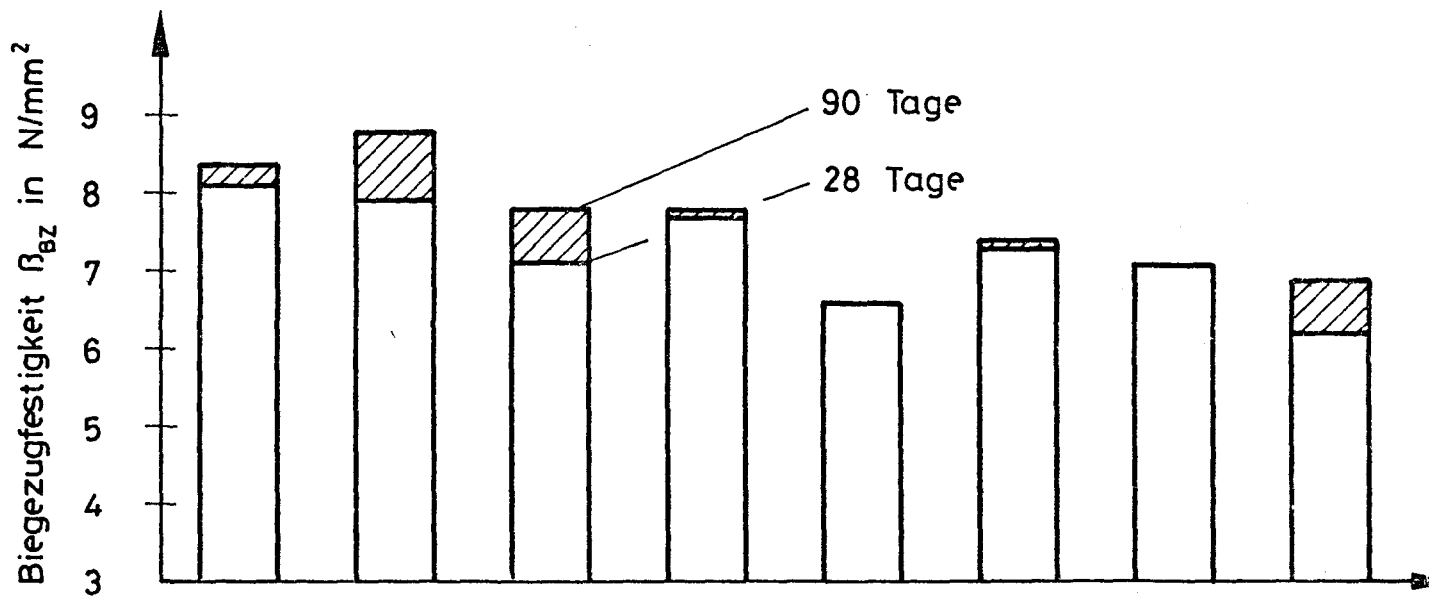
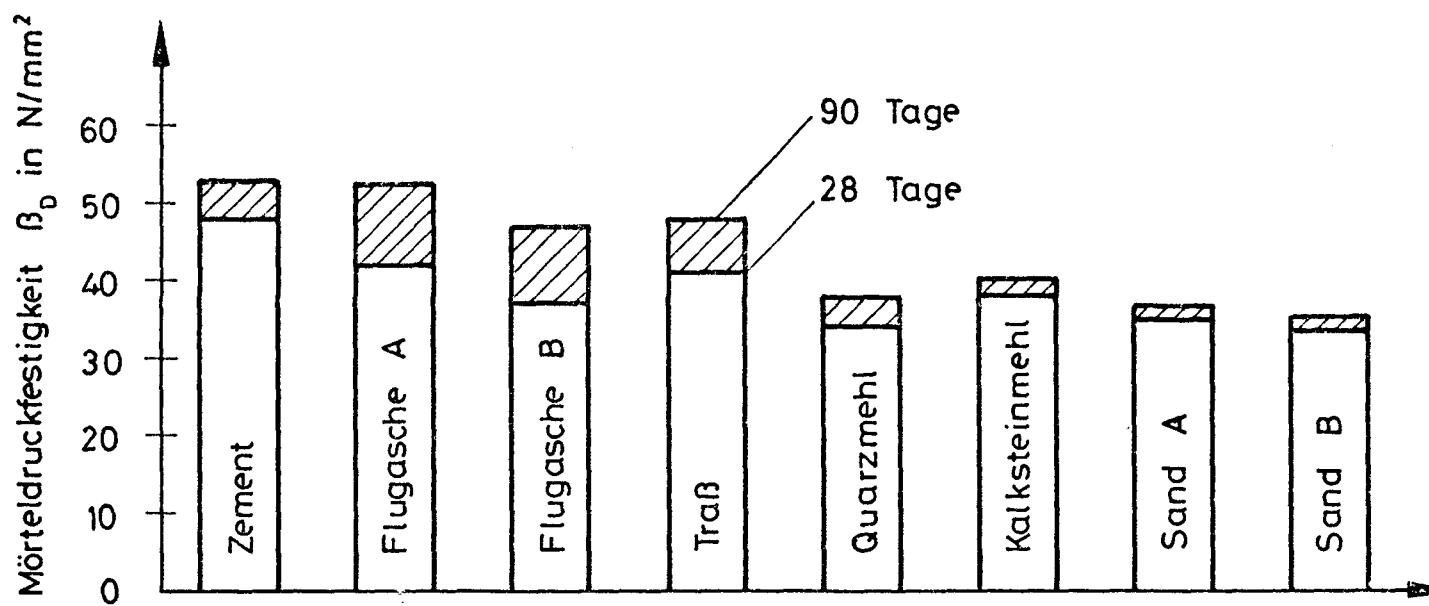


Bild 4.17

Ergebnisse der Mörtelversuche

# Sieblinie des Zuschlags

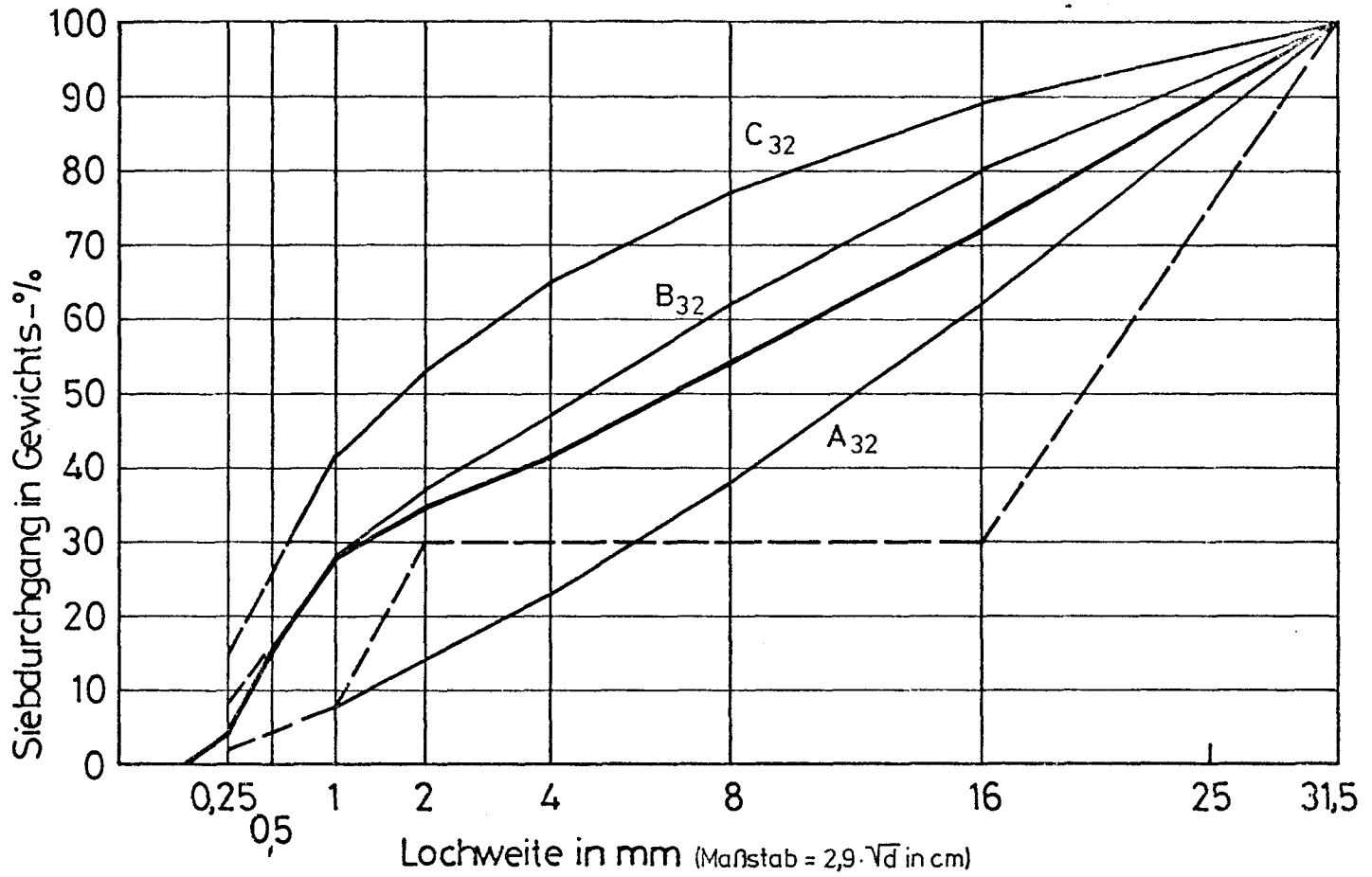


Bild 5.1: Sieblinien der Zuschlagstoffe für die Betonversuche

T a b e l l e 6.1: Frischbetoneigenschaften der Versuchsbetone

Zusatz- stoff	Beton Nr.	Ausbreitmaß		Verdichtungs- maß		Vebe-Wert		LP-Gehalt p %	Rohdichte $\rho_{b,h}$ kg/m <sup>3</sup>	Betontemperatur t <sub>b</sub> °C
		a <sub>0</sub> cm	a <sub>30</sub> cm	v <sub>0</sub> -	v <sub>30</sub> -	V <sub>0</sub> s	V <sub>30</sub> s			
ohne	1.0-1	35	31	1,14	1,13	3,0	4,0	1,5	2410	22
	2.0-1	39	34	1,07	1,10	1,7	2,2	1,3	2410	20
	2.0-2	33	29	1,11	1,16	3,0	3,9	1,3	2420	19
	3.0-1	36	33	1,08	1,13	2,3	2,8	1,3	2410	21
	4.0-1	38	35	1,07	1,10	1,6	2,5	1,1	2410	21
	5.0-2	35	32	1,09	1,14	2,8	3,2	1,2	2410	18
Flugasche A	1.1-1	38	33	1,06	1,11	1,4	2,2	1,0	2420	19
	1.2-1	40	36	1,02	1,11	1,0	2,0	1,3	2400	21
	1.2-2	35	32	1,14	1,18	3,0	3,5	1,5	2410	20
	1.3-1	39	34	1,03	1,09	2,0	2,6	1,1	2400	20
	1.4-1	36	31	1,10	1,17	2,2	3,7	1,6	2400	20
	1.4-2	36	32	1,11	1,20	1,8	3,6	1,8	2370	21
Flugasche B	2.2-1	32	30	1,15	1,23	3,0	5,0	1,6	2400	21
	2.2-2	32	29	1,17	1,20	3,4	4,4	1,8	2380	19
	2.3-1	29	26	1,19	1,27	2,8	2,8	1,8	2370	19
	2.4-1	29	26	1,24	1,25	3,6	4,5	2,2	2330	19
	2.4-2	25	-	1,24	1,35	5,5	9,4	2,4	2350	19
Traß	3.1-1	35	31	1,11	1,18	2,3	2,7	1,4	2410	21
	3.1-2	36	32	1,07	1,13	2,1	2,6	1,4	2410	20
	3.2-1	27	26	1,26	1,30	3,4	4,5	1,9	2410	19
	3.2-2	26	25	1,29	1,33	4,1	6,3	1,8	2390	19
	3.3-1	-	-	1,39	1,45	15,1	-	2,8	2360	20
	3.4-1	-	-	1,39	1,40	20,0	21,5	3,0	2370	18
Quarzmehl	4.1-1	36	31	1,08	1,13	1,9	2,5	1,2	2410	19
	4.2-1	30	29	1,21	1,23	3,7	4,0	1,5	2410	18
	4.2-2	38	34	1,05	1,08	1,8	2,2	1,2	2400	19
	4.3-1	26	25	1,27	1,29	4,7	5,5	1,8	2400	20
	4.4-1	35	32	1,11	1,16	2,1	3,0	1,3	2380	18
	4.4-2	30	28	1,25	1,27	3,3	3,8	1,7	2400	18
Kalkstein- mehl	5.1-1	36	31	1,11	1,15	2,5	2,8	1,1	2390	16
	5.2-1	32	29	1,19	1,23	2,7	3,8	1,6	2410	20
	5.2-2	30	27	1,22	1,25	3,1	4,8	1,6	2410	21
	5.3-1	28	25	1,30	1,35	7,7	7,9	1,5	2400	18
	5.4-1	25	23	1,32	1,36	7,2	9,0	2,4	2390	18
	5.4-2	-	-	1,36	1,42	5,6	10,3	2,3	2380	20
Sand A	6.1-1.1	33	30	1,12	1,17	2,3	3,2	1,3	2410	19
	6.1-1.2	37	30	1,12	1,17	1,7	2,8	1,3	2380	17
	6.2-1	31	29	1,17	1,23	3,2	3,8	1,8	2390	18
	6.2-2	34	30	1,14	1,14	2,8	2,8	1,5	2390	17
	6.3-1	31	28	1,18	1,22	2,8	4,0	1,8	2370	18
	6.4-2	29	28	1,22	1,25	3,5	5,0	3,0	2350	18
Sand B	7.1-1	37	33	1,07	1,12	1,9	3,0	1,4	2340	17
	7.2-1	33	31	1,16	1,20	2,7	3,8	1,6	2390	16
	7.2-2	38	33	1,07	1,14	2,2	2,5	1,3	2400	17
	7.3-1	31	28	1,25	1,29	3,5	4,2	1,9	2360	19
	7.4-1	29	26	1,19	1,25	3,2	4,4	1,8	2380	18



Tabelle 6.2: Festbetoneigenschaften der Versuchsbetone

Zusatz- stoff	Beton- Nr.	Druckfestigkeit $\beta_{W150}$ in N/mm <sup>2</sup>			Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>		Elastizitäts- modul  kN/mm <sup>2</sup>	Wassereindring- tiefe  cm	Masseverlust in % nach	
		$\beta_{W7}$	$\beta_{W28}$	$\beta_{W56}$	$\beta_{BZ}$	$\beta_{SZ}$			20 Frost-Tau-Wechseln	50
ohne	1.0-1	-	45	-	4,6	3,5	/	-	-	-
	2.0-1	-	40	-	4,9	4,0		-	-	-
	2.0-2	36	47	56	-	-	30,6	2,1	15	30
	3.0-1	-	46	-	4,1	3,5	-	-	-	-
	4.0-1	-	46	-	4,7	3,7	-	-	-	-
	5.0-2	39	47	55	-	-	31,0	1,9	9	23
Flugasche A	1.1-1	-	50	-	5,4	3,8	-	-	-	-
	1.2-1	-	50	-	5,0	3,7	-	-	-	-
	1.2-2	41	58	51	-	-	32,4	2,0	-	-
	1.3-1	-	53	-	5,4	3,9	-	-	-	-
	1.4-1	-	49	-	5,1	4,3	-	-	-	-
	1.4-2	38	55	62	-	-	31,6	2,0	12	22
Flugasche B	2.2-1	-	49	-	4,2	3,8	-	-	-	-
	2.2-2	38	59	53	-	-	31,4	2,0	8	20
	2.3-1	-	46	-	5,4	4,0	-	-	-	-
	2.4-1	-	47	-	5,3	3,8	-	-	-	-
	2.4-2	37	48	52	-	-	30,3	1,2	2	9
	2.4-2	37	48	52	-	-	30,3	1,2	2	9
Traß	3.1-1	-	50	-	5,0	3,8	-	-	-	-
	3.1-2	41	53	56	-	-	31,5	1,6	10	21
	3.2-1	-	59	-	5,5	4,4	-	-	-	-
	3.2-2	41	56	58	-	-	30,0	1,2	4	11
	3.3-1	-	51	-	5,2	3,9	-	-	-	-
	3.4-1	-	57	-	6,0	4,5	-	-	-	-
Quarzmehl	4.1-1	-	43	-	4,3	3,6	-	-	-	-
	4.2-1	-	47	-	5,0	3,9	-	-	-	-
	4.2-2	33	44	49	-	-	29,6	1,4	9	26
	4.3-1	-	49	-	4,7	3,6	-	-	-	-
	4.4-1	-	42	-	4,5	3,6	-	-	-	-
	4.4-2	35	37	52	-	-	30,7	1,3	5	14
Kalkstein- mehl	5.1-1	-	48	-	4,7	3,4	-	-	-	-
	5.2-1	-	49	-	4,4	3,5	-	-	-	-
	5.2-2	36	49	52	-	-	27,5	1,9	10	24
	5.3-1	-	50	-	4,6	3,7	-	-	-	-
	5.4-1	-	54	-	4,3	3,9	-	-	-	-
	5.4-2	43	51	45	-	-	31,4	-	9	24
Sand A	6.1-1.1	-	47	-	4,8	3,6	-	-	-	-
	6.1-1.2	-	50	-	4,7	4,0	-	-	-	-
	6.2-1	-	52	-	4,7	3,7	-	-	-	-
	6.2-2	37	50	55	-	-	30,5	1,8	12	23
	6.3-1	-	47	-	4,6	3,7	-	-	-	-
	6.4-2	38	50	50	-	-	28,1	1,6	2	6
Sand B	7.1-1	-	49	-	5,3	6,1	-	-	-	-
	7.2-1	-	48	-	5,0	3,5	-	-	-	-
	7.2-2	35	46	50	-	-	32,4	2,0	12	25
	7.3-1	-	44	-	4,4	3,6	-	-	-	-
	7.4-1	-	41	-	4,7	4,2	-	-	-	-
	7.4-1	-	41	-	4,7	4,2	-	-	-	-

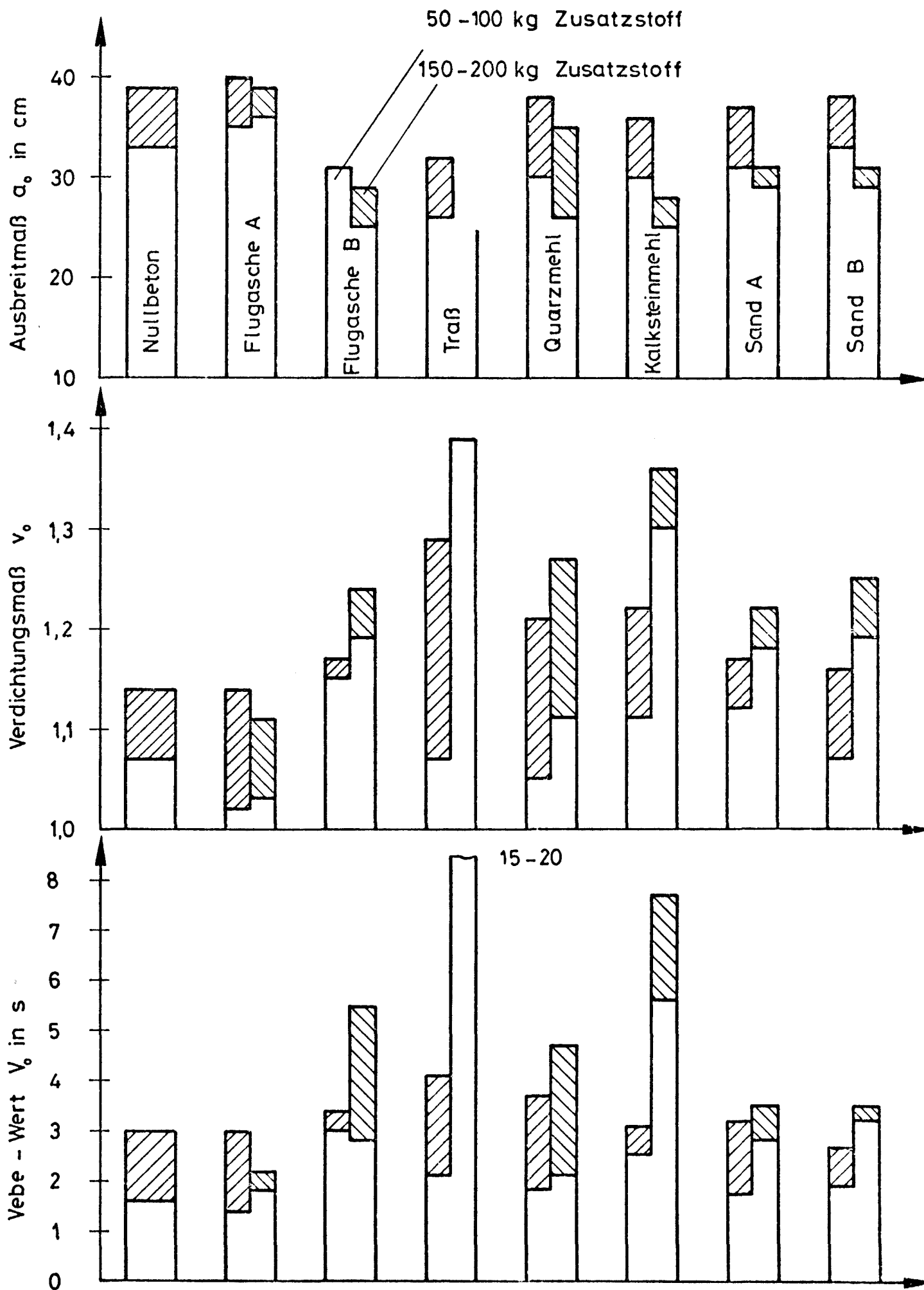


Bild 6.3 Frischbetoneigenschaften der Betone

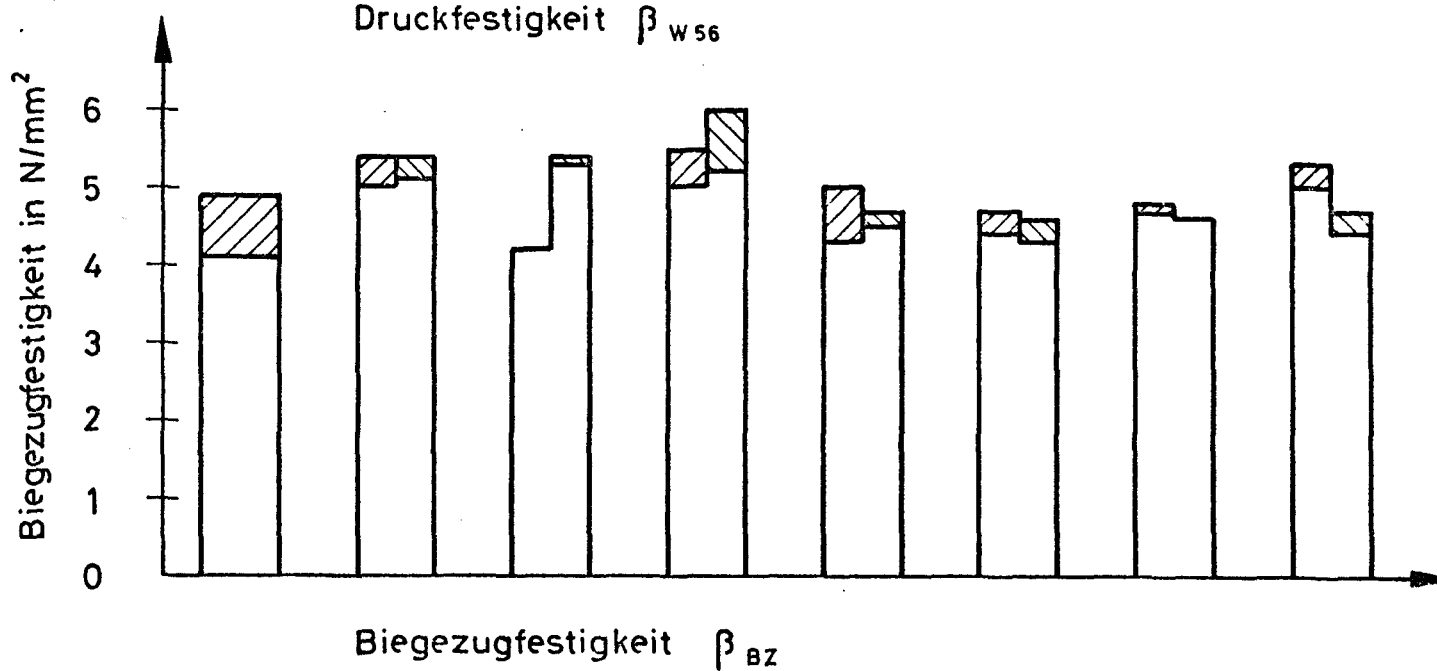
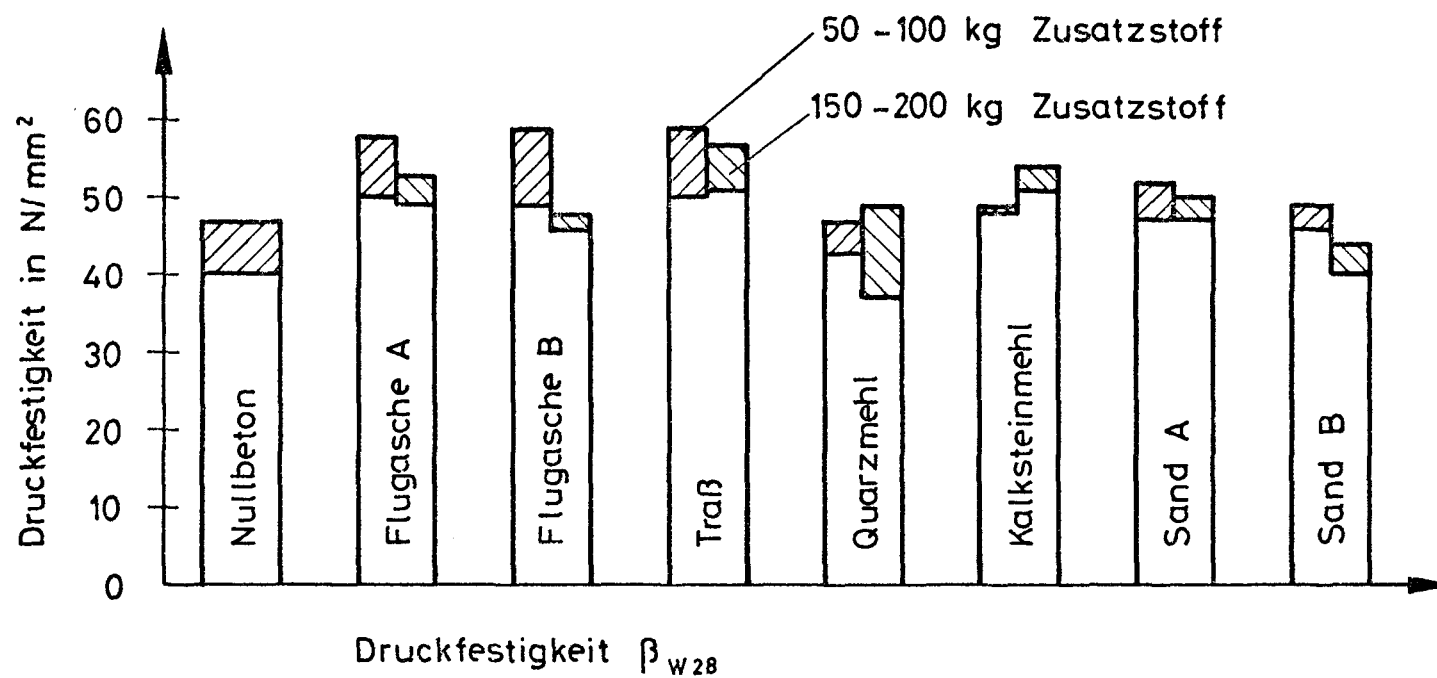


Bild 6.4 Festigkeitseigenschaften der Versuchsbetone

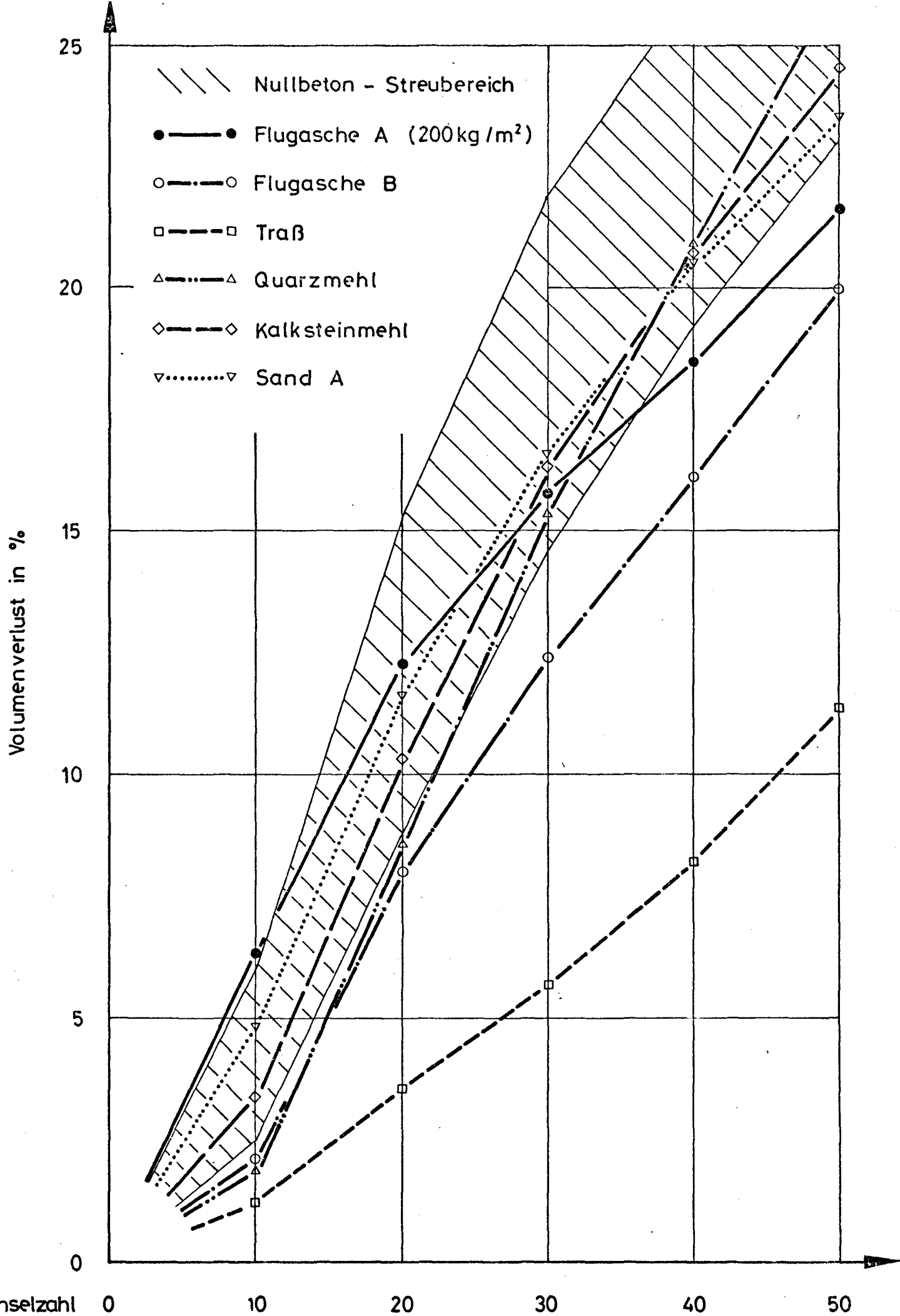


Bild 6.5 Ergebnisse der Frostversuche , Betone mit 100 kg Zusatzstoff